



HAL
open science

Lumiducs : histoire et enjeux dans la ville contemporaine

Mohammed-Yazid Attaoua

► **To cite this version:**

Mohammed-Yazid Attaoua. Lumiducs : histoire et enjeux dans la ville contemporaine. Architecture, aménagement de l'espace. 2016. dumas-01383832

HAL Id: dumas-01383832

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01383832>

Submitted on 19 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS

SPECIALITE AMBIANCES ET FORMES URBAINES

Année 2015 /2016

Thèse de Master STEU

*Diplôme cohabilité par
l'École Centrale de Nantes,
l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes
l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes,
l'Université de Nantes*

Présentée et soutenue par :

MOHAMMED-YAZID ATTAOUA

le : 28 Septembre 2016
à : l'Ecole nationale supérieure d'architecture de Nantes

TITRE

LUMIDUCS : HISTOIRE ET ENJEUX DANS LA VILLE CONTEMPORAINE

JURY

Président : Pascal Joanne

Fonction : MA – ENSA Nantes

Examineurs :

Pascal Joanne
Thomas Leduc
Ignacio Requena-Ruiz
Daniel Siret

Fonction : MA – ENSA Nantes
Fonction : IR- CNRS
Fonction : MA – ENSA Nantes
Fonction : Chercheur MCC- HDR

Directeur de mémoire : Daniel Siret
Laboratoire/Institution : CRENAU / UMR. CNRS 1563. AAU
Co-encadrant : Ignacio Requena-Ruiz et Céline Drozd

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

LUMIDUCS : HISTOIRE ET ENJEUX DANS LA VILLE CONTEMPORAINE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

A la lumière qui éclaire ma voie ...

mon père Smain et ma mère Fatma

Remerciement

Ce travail de recherche n'aurait pas pu être mené sans le concours de personnes que je ne remercierai jamais assez avec ces quelques lignes.

Tout d'abord, je tiens remercier Daniel Siret le directeur de mon stage pour avoir mis à ma disposition sa grande expérience et d'avoir veillé au déroulement de mon stage dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier Ignacio Requena-Ruiz et Céline Drozd pour leurs conseils précieux, me permettant d'exceller et de guider ma démarche de recherche depuis le début de mon stage.

A mes confrères et consœurs du Master STEU et du CRENAU auprès de qui j'ai trouvé appui et partagé mes préoccupations durant ma présence dans le laboratoire.

Enfin, mes sincères remerciements sont adressés à l'ensemble de l'équipe du CRENAU et du personnel de la bibliothèque de l'ENSA Nantes pour leur bienveillance, leur accueil chaleureux, et pour les moments agréables que j'ai pu partager en leur présence.

Mohammed-Yazid Attaoua

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Résumé

Dans un contexte de densité urbaine fortement créateur d'ombre, nous nous intéressons au lumiduc : dispositif d'éclairage consistant à transporter la lumière du jour à l'intérieur des espaces profonds. Ce dispositif dont l'histoire remonte au 19^{ème} siècle, a vécu des bouleversements historiques le plus souvent très divergents qui ont mené à l'invention du lumiduc contemporain au milieu du 20^{ème} siècle.

Ainsi dans ce travail de recherche, nous avons examiné d'une part les différents paramètres techniques du dispositif à travers une lecture dans la littérature spécialisée, et d'autre part l'imaginaire urbain rattaché à son usage à travers certains cas de figures utopiques. Enfin, nous avons réalisé une étude prospective posant la question du devenir de la forme architecturale et urbaine se basant essentiellement sur une stratégie d'éclairage par des lumiducs.

Mots clés : lumiduc, lumière naturelle, transport de la lumière naturelle, espaces profonds, formes urbaines denses, architecture et urbanisme souterrains.

Abstract

In a context of high urban density shadow creator, we are interested in lumiduct / light-pipe: device used to channel daylight deep inside the spaces. This system which dates back to the 19th century has experienced historic changes often widely divergent that led to the invention of contemporary lumiduct/ light-pipe in the mid-20th century. In this research work, we examined the various technical parameters of the device through a specialized literature reading, and the urban imaginary which is attached, by taking a few urban utopian cases. Finally, we conducted a prospective study raising the question of the future of architecture and urban form where the lighting strategy is mainly based on the use of lumiduct/ light-pipe.

Key words: lumiduct, light pipe, Daylight Guiding Systems, daylight transport systems, daylighting, deep urban spaces, urban density, underground architecture and urbanism.

Contexte du stage

Le stage s'est effectué au sein du laboratoire de l'ENSA Nantes : le CRENAU, à l'unité mixte de recherche UMR AAU, 1563 CNRS/MCC/ECN pendant une période de 6 mois à partir du 1er Mars 2016. Cette étude s'inscrit dans le thème plus général des dispositifs d'ambiances lumineuses à l'intérieur des espaces urbains, menée en collaboration avec Leroy Merlin Source.

TABLES DES MATIERES

Remerciement	5
Résumé	6
Abstract	6
Contexte du stage	6
TABLES DES MATIERES	7
1 Chapitre 1. Lumière naturelle et architecture	10
1.1 Contexte général	10
1.2 La Lumière	10
1.2.1 La lumière visible	11
1.2.2 La lumière naturelle	11
1.2.3 Lumière du jour et santé humaine.....	12
1.3 Transmission de la lumière naturelle dans l'espace construit	13
1.3.1 Les dispositifs d'éclairage naturel	13
1.3.2 La fenêtre verticale.....	14
1.3.3 Paramètres de dimensionnement de la fenêtre latérale.....	14
1.3.4 La fenêtre zénithale.....	15
1.3.5 Paramètres influençant la transmission de la lumière naturelle.....	16
1.3.6 limites des dispositifs d'éclairage naturel.....	18
1.4 Filtrage de la lumière naturelle dans l'espace intérieur	18
1.4.1 Persiennes et systèmes aveugles.....	19
1.5 Maximisation de la lumière naturelle dans l'espace profond	19
1.5.1 Étagère réfléchissante (light shelf).....	19
1.5.2 Panneaux prismatiques	20
1.5.3 Les verres défecteurs	20
1.5.4 Panneaux coupés au laser (Laser-Cut panel)	22
1.5.5 Autres dispositifs de filtrage et de maximisation de la lumière naturelle.....	23
1.5.6 Limites des systèmes de maximisation de la lumière naturelle	24
1.6 Transport de la lumière naturelle dans l'espace intérieur profond	25
1.6.1 Contexte actuel	25
1.6.2 Le lumiduc contemporain	26
1.6.3 Contexte urbain contemporain.....	27
1.6.4 Densité construite	27
1.6.5 Enjeux urbains contemporains.....	27
1.6.6 Ambiance des espaces profonds souterrains	31
1.7 Problématique	31
1.8 Méthodologie	32
2 Chapitre 2. Lumiduc : de l'utopie au réel	34

2.1	Idée de canalisation de la lumière dans l'histoire	34
2.1.1	Il y a 5000 ans, les miroirs réflecteurs dans l'Egypte antique.....	34
2.1.2	En 212 A.J. les miroirs ardents d'Archimède.....	34
2.1.3	Au 11 ^{ème} siècle, les miroirs ardents d'Ibn Al-Haytham (Alhazen)	37
2.1.4	En 1841, la fontaine lumineuse de Jean-Daniel Colladon.....	38
2.1.5	En 1842, La canalisation de la lumière dans un liquide (J. Babinet)	40
2.1.6	En 1843, l'héliostat de J. T. Silbermann	40
2.1.7	En 1854, la fontaine lumineuse et J. Tyndall.....	42
2.1.8	En 1853, La fontaine lumineuse à l'Opéra de Paris.....	43
2.1.9	En 1880, Le photophone d'Alexander Graham Bell.....	43
2.1.10	En 1881, l'appareil d'éclairage des maisons de William Wheeler	45
2.1.11	En 1901, l'appareil de transport de la lumière du jour dans le sous-sol d'Odilon Baltzar Hannibal Hanneborg :	49
2.2	Lumiduc, entre utopies, science-fiction et littérature scientifique.....	51
2.2.1	En 1932, le projet utopique du Depthscraper.....	51
2.2.2	En 1970, la ville utopique d'Ecopolis de Guy Rottier.....	51
2.2.3	Roman de science-fiction : <i>la vallée du temps profond</i> de Michel Jeury.....	55
2.2.4	TPFE : Entre science-fiction et prospective, à propos du logement collectif de F.Tribel.....	57
2.2.5	Article scientifique : Entre nostalgie et prospective, le temps présent de Colette Pétonnet.....	59
2.3	Précurseurs du Lumiduc.....	60
2.3.1	Kei Mori : transport de la lumière naturelle par fibre optique	60
2.3.2	Lorne Whitehead : transport de lumière naturelle par tube prismatique	61
2.3.3	Steven Sutton : transport de lumière naturelle par conduits à parois métalliques 62	
2.4	Synthèse	63
3	Chapitre 3. Technologie du lumiduc contemporain	65
3.1	Concept du lumiduc.....	65
3.1.1	Définition.....	65
3.1.2	Éléments composants le lumiduc.....	68
3.1.3	Procédés de transport de la lumière.....	70
3.1.4	Types de Lumiducs	71
3.1.5	Paramètres de dimensionnement.....	72
3.1.6	Fabricants	73
3.2	Efficacité lumineuse du lumiduc	74
3.2.1	Selon les fabricants de lumiducs	74
3.2.2	Le modèle mathématique de Zhang et al, 2001	74
3.2.3	Expérimentalement par Paroncini et al, 2007	74
3.2.4	Limites des lumiducs	75

3.3	Ambiance lumineuse associée au lumiduc.....	75
3.3.1	Perception de la lumière diffusée d'un lumiduc.....	75
3.3.2	Effet de la lumière du lumiduc avec et sans fenêtre	76
3.3.3	Spectre lumineux transmis par un lumiduc	77
3.4	Efficacité énergétique du lumiduc.....	78
3.5	Illustrations de projets d'architecture avec des lumiducs	79
3.5.1	Centre de distribution européen de 3M, Projet EU d'Arthelio, Carpiano. Italy	79
3.5.2	The Low Line: jardin urbain souterrain sous New York, Etats Unies	83
3.5.3	Bâtiment de la faculté de génie civil de l'université de Minnesota. Etats Unis.....	86
3.5.4	Héliobus, Lumiduc à tube prismatique, Suisse	87
4	Chapitre 4 : Lumiduc et forme urbaine : étude prospective	89
4.1	Introduction	89
4.2	Méthode	89
4.2.1	Croisement	89
4.3	Analyse paramétrique architecturale	91
4.3.1	Lumiduc et façade	92
4.3.2	Lumiduc, toiture et sol	93
4.3.3	Lumiduc et plafond.....	97
4.3.4	Lumiduc et plancher.....	98
4.3.5	Lumiduc et murs.....	98
4.3.6	Lumiduc et hauteur du bâtiment.....	99
4.3.7	Lumiduc et épaisseur bâtiment.....	99
4.4	Analyse thématique urbaine	100
4.4.1	Lumiduc et rue.....	100
4.4.2	Lumiduc et paysage urbain	103
4.4.3	Lumiduc et silhouette urbaine	103
4.4.4	Lumiduc et intériorité.....	104
4.4.5	Lumiduc compacité et porosité.....	105
4.4.6	Lumiduc et climat	106
4.4.7	Lumiduc et végétation.....	106
4.4.8	Lumiduc et déplacement urbain	107
4.4.9	Lumiduc et soleil durable	108
5	Chapitre 5. Conclusion générale	109
5.1	Difficultés rencontrées durant la recherche.....	110
5.2	Perspectives pour la suite de la recherche.....	110
6	Annexes	111
7	Table des Figures.....	142
8	Bibliographie.....	146
9	Webographie	151

1 Chapitre 1. Lumière naturelle et architecture

1.1 Contexte général

La lumière faisait référence à la divinité (Hobday, 2006). Dans l'antiquité, les cérémonies religieuses prenaient place au milieu de jeux complexes de volumes et d'axes urbains construits en référence à la course du soleil, comme en Egypte ou en Grèce (Boubekri, 2008). A l'époque romaine, l'accès à la lumière du soleil était un droit public qui constituait une base de la législation des formes urbaines (Butti et Perlin, 1980). Ces deux imaginaires sont des témoins, exemples de l'usage varié du rayonnement solaire dans la fabrication de la forme urbaine. En effet, la lumière du jour a représenté depuis millénaires, une composante essentielle dans la définition de l'espace intérieur et la perception de ses dimensions (Reiter et Deherde, 2003), servant de repère dans le temps et un moyen pour accomplir les tâches quotidiennes. Les ouvertures dans l'enveloppe extérieure étaient le moyen principal pour rester en communication avec le monde extérieur, permettant d'avoir accès à l'intérieur, de disposer de l'espace et d'en sortir pour exploiter l'environnement.

En plus de la lumière, ces ouvertures jouent un rôle important dans la pénétration de l'air frais, du son, de la chaleur et globalement des facteurs sensibles de l'environnement (Idem).

Dans notre étude, nous nous intéressons au rapport de la lumière du jour à la forme urbaine.

1.2 La Lumière

Par définition, la lumière est la portion du spectre électromagnétique auquel notre œil est visuellement sensible (Lechner, 2014). La lumière que nous percevons peut être de sources naturelles et artificielles diverses (Figure 1-1).

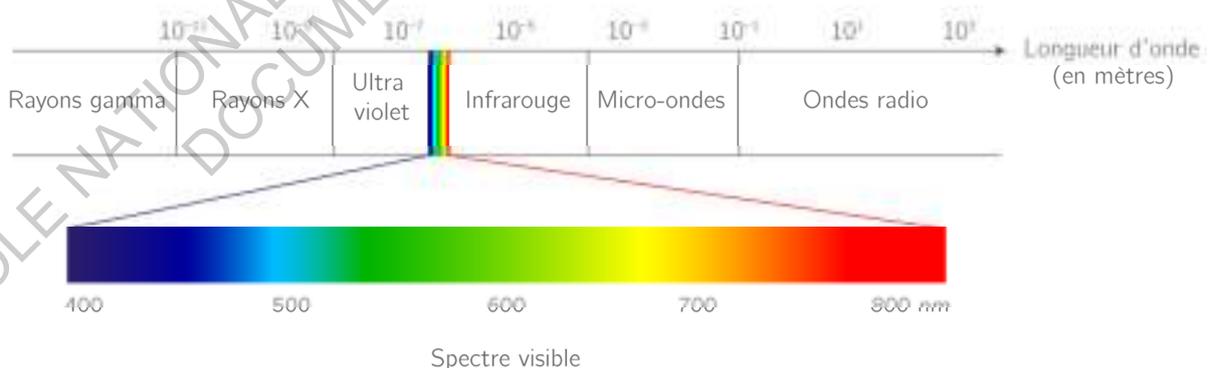


Figure 1-1 Schéma. Spectre de lumière naturelle. (kartable.fr)

1.2.1 La lumière visible

Le spectre naturel contient toutes les longueurs d'ondes, aussi bien visibles comprises entre 400nm et 800nm, que celles invisibles : courtes c'est-à-dire l'Ultraviolet et les ondes longues c'est-à-dire infrarouges (M.C. Lam, 1986) (Figure 1-1). Bien qu'une lumière provenant de source artificielle permette de réaliser les tâches les plus complexes, elle ne permet pas de reproduire l'ensemble du spectre naturel (Idem). Contrairement à l'œil humain, certaines espèces animales ont la capacité de percevoir les autres longueurs d'onde (Boubekri, 2008).

1.2.2 La lumière naturelle

La lumière naturelle /du jour a comme base le soleil et la voute céleste. Elle est directe par ciel dégagé et indirecte par ciel couvert (Lechner, 2015). De plus, les objets qui se trouvent autour d'une surface ou d'un espace éclairé, sont une source indirecte de lumière naturelle (Benharket, 2006). Dans certains cas, ces derniers représentent la principale source de lumière naturelle d'un espace (Lechner, 2015). Les bâtiments peints en blancs et les surfaces de façades réfléchives, peuvent réfléchir jusqu'à 70% de lumière reçue (Idem) (Figure 1-2).

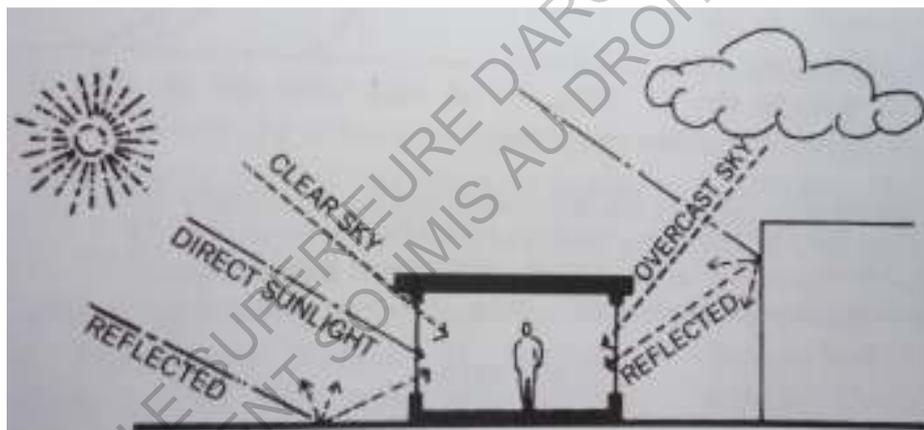


Figure 1-2 Dessin. Les sources de la lumière naturelle. (Lechner, 2015)

Prenant les deux cas extrêmes de ciel clair ensoleillé et couvert, il existe des différences dans la quantité, la qualité, le type de diffusion, la couleur de la lumière transmise et de l'usage qui en est fait.

Par ciel couvert, la distribution lumineuse est trois fois plus importante au zénith comparée à l'horizon (Lechner, 2015). La quantité de lumière représente une valeur faible variant de 5000 à 20000 lux comparée à la valeur transmise par ciel clair ensoleillé (Idem). Dans ce dernier cas, elle varie de 60000 à 100000 lux (Idem) (Figure 1-3).

La lumière naturelle peut prendre deux apparences fondamentales : une tache lumineuse, définissant des contours clairs avec des contrastes ombres / lumière très importants, ou une lumière diffuse où l'ombre portée est presque inexistante.

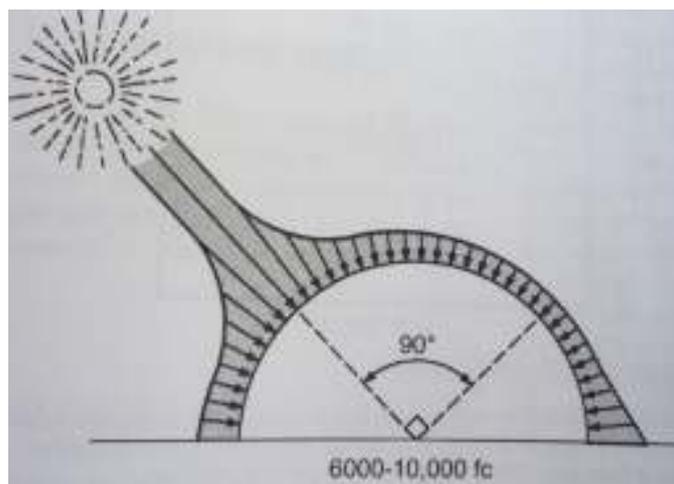


Figure 1-3 Dessin. Distribution lumineuse par ciel dégagé (Lechner, 2015)

1.2.3 Lumière du jour et santé humaine

Les spécialistes de la question s'accordent à dire que la lumière directe du soleil représente l'élément vital de base pour l'homme et son environnement végétal et animal (Boubekri, 2008). Elle a un effet déterminant sur certaines fonctions biologiques, hormonales, et physiologiques, qui ne sont coordonnées qu'à travers sa présence (Idem).

Ses effets sur la santé sont multiples, nous citons comme exemple la régulation de la sécrétion de certaines hormones comme la mélatonine qui contribue à la sensation de fatigue et à la baisse de vigilance, du cortisol connu pour être l'hormone responsable de l'éveil et de l'humeur chez les individus (Idem). Ces hormones sont nécessaires à l'équilibre de l'horloge biologique interne (rythme circadien) (Idem).

L'effet le plus important pour le métabolisme humain est celui de la production de la vitamine D, nécessaire à l'absorption du calcium par le corps (M.C. Lam, 1986). Le manque de cette vitamine, provoque un affaiblissement du système immunitaire et des maladies chroniques dont la plus connue est le rachitisme (Idem). Par ailleurs, l'exposition prolongée au soleil était la solution que le mouvement hygiéniste du 19^{ème} siècle avait entrepris de mettre en œuvre pour lutter contre autre maladie : la tuberculose, avant la découverte à partir des années 1920 de la pénicilline (Siret, 2013). D'un point de vue cognitif, la capacité d'apprentissage chez les élèves et la performance au travail sont améliorées grâce à l'exposition à la lumière du jour (Boubekri, 2008). De plus, il est démontré que la couleur et l'uniformité du spectre lumineux solaire, permettent de limiter l'effet de vieillissement dû à l'activité professionnelle (Idem) Le spectre de la lumière naturelle permet d'éviter la fatigue des yeux (Boubekri, 2008)¹.

¹Les études sur les effets de la lumière du jour, peuvent être retrouvés dans les références : **M. Boubekri**, *Daylighting, Architecture and Health, Building Design Strategies*, Routledge, 2008 et de **R. Hobday**, *The Light Revolution : Health, Architecture, And the Sun*, Findhorn Press Ltd, 2006

La lumière directe du soleil possède une très grande intensité lumineuse, c'est pourquoi il est parfois difficile de l'utiliser directement pour effectuer des tâches quotidiennes (M.C. LAM, 1986). Idéalement, elle est contrôlée par le biais de dispositifs d'éclairage naturel (Idem).

Dans notre étude, nous nous intéressons aux procédés et dispositifs de transmission, de contrôle et de transport de cette lumière. Nous parlerons selon le contexte, de lumière du jour, de rayonnement solaire, d'ensoleillement ou de lumière naturelle. Ainsi, nous excluons la lumière provenant des sources artificielles.

1.3 Transmission de la lumière naturelle dans l'espace construit

La lumière directe représente une ressource importante dans les espaces intérieurs construits, aussi bien pour l'éclairage que pour le chauffage (Boubekri, 2008).

Avant que les technologies s'éclairage d'aujourd'hui soient découvertes et développées, des facteurs comme l'orientation, la disposition des espaces intérieurs et la configuration des éléments du bâtiment (murs, toitures, ouverture), étaient les principaux paramètres qui décident à la fois de la quantité et de la qualité de l'éclairage dans les espaces intérieurs (Boubekri, 2008). Traditionnellement, les dispositifs d'éclairage naturel sont fonctions de ces paramètres.

1.3.1 Les dispositifs d'éclairage naturel

Nous entendons par dispositifs d'éclairage naturel, toute ouverture, surface ou canal permettant de transmettre un flux de lumière naturelle depuis l'extérieur vers l'intérieur d'un espace construit.

Historiquement, les romains sont connus pour être les pionniers du verre. Ils s'en servaient pour couvrir les ouvertures sur l'enveloppe du bâtiment, cela leur permettait de capturer le rayonnement nécessaire à l'éclairage et au chauffage (Boubekri, 2008).

Le rôle des dispositifs d'éclairage traditionnels, dépend de plusieurs facteurs dont le principal est le facteur climatique (Reiter et Deherde, 2003). En été, ils permettent de collecter une quantité de lumière naturelle nécessaire pour l'éclairage tout en minimisant le gain de calories. En hiver, un maximum de lumière naturelle et un minimum de pertes de chaleur est requis (Lechner, 2015)². Deux rôles parfois contradictoires qu'il est difficile pour ces dispositifs de satisfaire dans toutes les situations (Benharket, 2006).

²L'histoire de l'architecture et de l'énergie solaire peut être trouvée dans la référence suivante : **Butti et Perlin**, *A Golden Thread : 2500 years of architecture and technologies*, Cheshire Books, 1980

Au même titre que ces préoccupations, s'ajoute l'exigence contemporaine d'un confort visuel qui tient compte de plusieurs paramètres : photométriques, environnementaux, psychologiques, physiologiques, ainsi que du type de travail effectué³.

Pour des raisons de commodité et de simplicité, les fenêtres verticales, et de manière moindre les fenêtres zénithales, sont les dispositifs les plus utilisés dans le bâtiment (Délétré, 2003). Ce type représente les dispositifs traditionnels (Boubekri, 2008).

1.3.2 La fenêtre verticale

La fenêtre est une baie comportant une fermeture vitrée montée sur la façade du bâtiment⁴. La fenêtre latérale est théoriquement le dispositif d'éclairage naturel le plus optimal en raison de ses qualités lumineuses, thermiques, sensorielles et sociales (Délétré, 2003). La communication et la porosité aux ambiances intérieure et extérieure, sont ses qualités principales (Benharket, 2006).

En effet, la fenêtre est tenue en même temps d'assurer l'éclairage et la protection de l'éblouissement, la vue sur l'extérieur et l'intimité à l'intérieur, l'étanchéité et la perméabilité à l'air, à la chaleur et au son (Idem). En situant l'entrée du jour, la fenêtre latérale est le plus souvent responsable de l'organisation de l'espace intérieur (Reiter et Deherde, 2003).

1.3.3 Paramètres de dimensionnement de la fenêtre latérale

Il existe plusieurs paramètres qui rentrent dans la définition de la fenêtre latérale que nous pouvons résumer par les points suivants :

a. La forme du bâtiment : les dimensions de la forme du bâtiment déterminent le pourcentage d'ouvertures sur l'enveloppe extérieure et le nombre de fenêtres possibles sur chaque façade (Lechner, 2015).

b. La surface du plancher : la surface de la fenêtre est déduite de la surface du plancher (Reiter et Deherde, 2003). Pour une bonne réparation de la lumière à l'intérieur de l'espace, celle-ci doit occuper l'équivalent de 15% de la surface de plancher en moyenne, en raison des multitudes de rôles que la fenêtre doit remplir (Lechner, 2015).

c. L'orientation du bâtiment : la qualité lumineuse de la fenêtre est étroitement liée à l'orientation de la forme du bâtiment (Idem). En hiver, pour avoir un gain de chaleur important, l'orientation sud des fenêtres est préférable (Idem). Dans le cas contraire, l'orientation nord est préférable (Idem). Les orientations Est et Ouest principalement pendant l'été, peuvent causer des effets d'éblouissement et de surchauffe sévères (Idem).

d. Climat : le type de climat a une influence considérable sur la dimension des ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment (Lechner, 2015).

³energieplus-lesite.fr

⁴http://www.biffsa.com/ressource_types/view/10

e. La profondeur de l'espace : La profondeur qu'une fenêtre permet d'éclairer dépend de la hauteur de celle-ci (Keeler et Burke, 2009). Un consensus général sur cette profondeur est compris entre 1.5 à 2.5 fois la hauteur sous linteau de la fenêtre (Lechner, 2015, Keeler et Burke, 2009, Boubekri, 2008, Reiter et Deherde, 2003). Cette zone qui peut aller de 4.5m à 6m est communément appelée : zone passive (Baker et Steemers, 2000) ou volume passif (Salat, 2011).

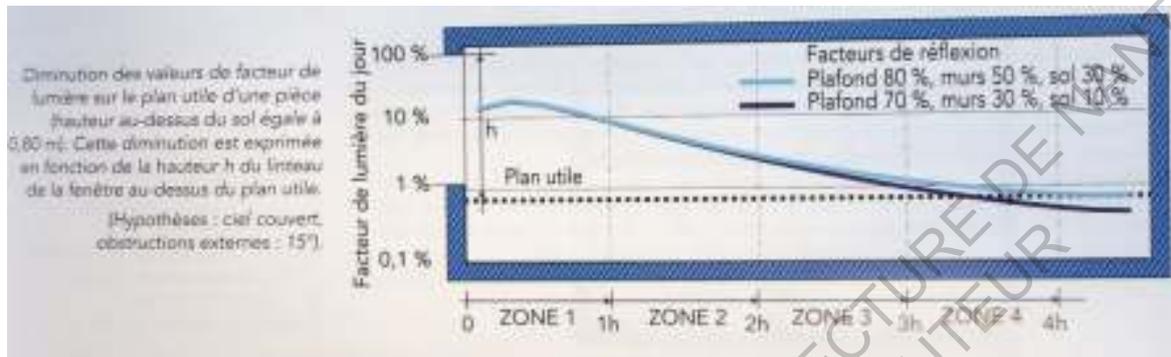


Figure 1-4 Graphique. Profondeur éclairée par une fenêtre verticale (Fontynont et al, 2001).

f. Positions de l'ouverture : celle-ci dépend de la distribution lumineuse souhaitée à l'intérieur de l'espace ainsi que du taux d'éblouissement à éviter (Lechner, 2015). En règle générale, une disposition bilatérale des fenêtres est préférable à une disposition unilatérale (Boubekri, 2008).

g. Matériaux de transmission : le comportement du matériau de transmission est un élément déterminant dans la qualité et la quantité de lumière collectée (Lechner, 2015). Il peut être clair ou teinté dont les propriétés lui permettent de sélectionner le spectre lumineux, en transmettant ou en réfléchissant certaines longueurs d'ondes (Idem). En règle générale, plus c'est teinté et absorbant moins il y a de transmission de lumière (Idem).

h. Aménagement intérieur : la forme intérieure ainsi que les éléments constituant sa configuration spatiale, les matériaux de revêtements des sols et des parois, contribuent considérablement à la quantité et la qualité de la lumière transmise par la fenêtre (Reiter et Deherde, 2003).

1.3.4 La fenêtre zénithale

Par définition, une fenêtre zénithale est l'ensemble des dispositifs d'éclairage naturel montés en toiture (Lechner, 2015). Ce type de dispositif reçoit de 3 à 5 fois plus de lumière qu'une fenêtre latérale, avec un gain de chaleur deux fois plus important lorsque celle-ci est orientée vers le sud en plein été (Délétré, 2003).

Les fenêtres peuvent être soit horizontales ou inclinés comme les fenêtre de toit (skylight), ou verticales comme les lanterneaux, les toits sheds et la fenêtre verticale en toiture (Lechner, 2015).

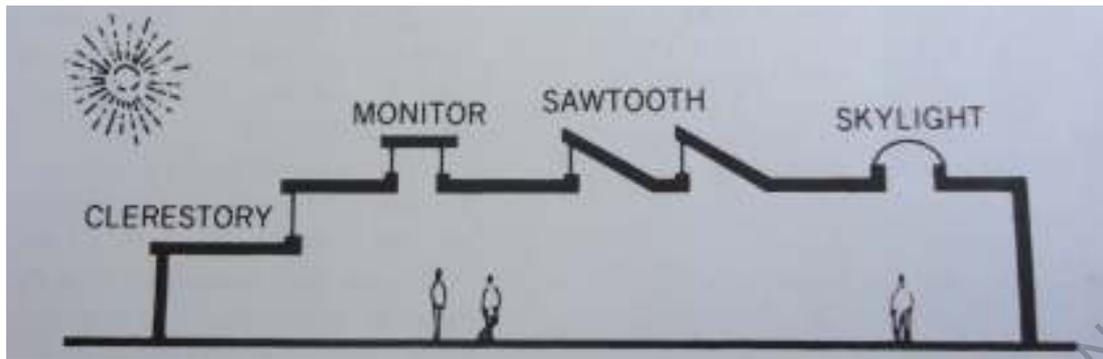


Figure 1-5 Dessin. fenêtres zénithales (Lechner, 2015)

L'avantage de l'éclairage zénithal est de donner une lumière homogène sur une très grande surface comparée à la fenêtre latérale, qui est limitée linéairement environ au double de sa hauteur (Idem)

Une bonne répartition d'un nombre de fenêtres zénithales, permet d'avoir une lumière homogène (Boubekri, 2008). Sous ciel couvert, l'espacement recommandé entre ouvertures zénithales est égal à la hauteur de l'espace (Idem)

1.3.5 Paramètres influençant la transmission de la lumière naturelle

a. La surface du dispositif de transmission : pour une journée ensoleillée, la moyenne journalière et annuelle est d'environ 40000 lux (Lechner, 2015). Sous des conditions de ciel clair, une surface de 0.09m² de fenêtre latérale, peut éclairer environ 12m² de surface de plancher avec une distribution uniforme de la lumière (Idem). Par ciel couvert, la même surface peut éclairer 3.6m² de surface de plancher (Idem). Un dimensionnement approprié peut permettre à une fenêtre d'éclairer une surface 40 fois plus grande (Idem).

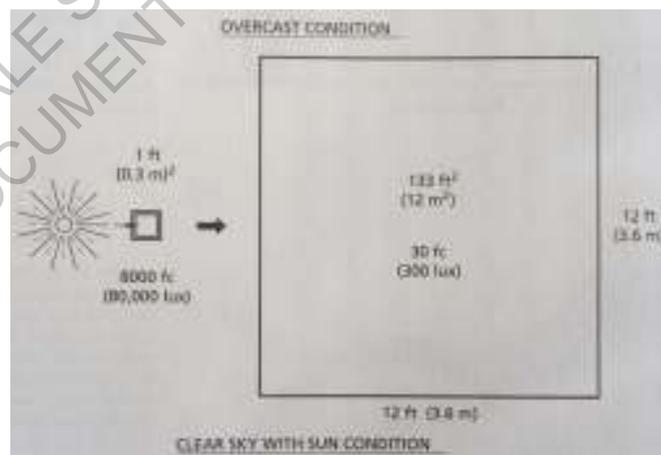


Figure 1-6 Dessin. Equivalent d'éclairage d'une fenêtre sous un ciel ensoleillé (Lechner, 2015)

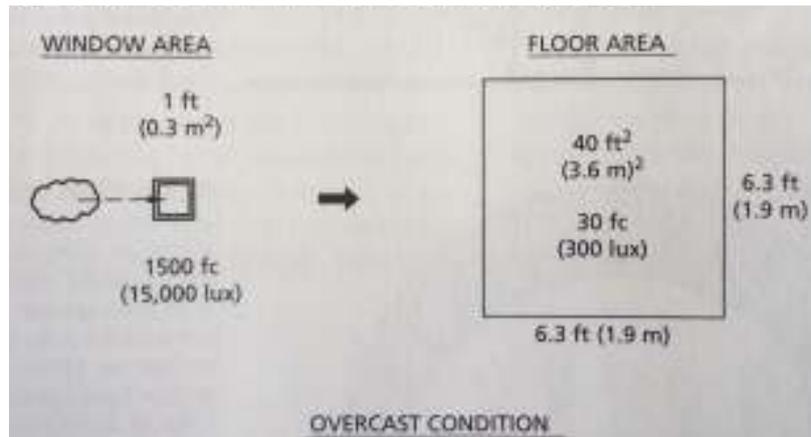


Figure 1-7 Dessin. Equivalent d'éclairage d'une fenêtre sous un ciel couvert (Lechner, 2015)

b. La hauteur de la fenêtre : tel que nous l'avons cité, plus la fenêtre est haute plus l'éclairage en profondeur de la salle est important (Reiter et Deherde, 2003). Par ailleurs, la luminosité est plus importante à la proximité immédiate de la fenêtre, et décroît rapidement au fur et à mesure qu'on s'en éloigne, pour devenir inappropriée pour la plupart de tâches visuelles (Idem).

c. La largeur de la fenêtre : si la fenêtre est plus large que haute et répartie majoritairement sur le mur de la façade, la lumière du jour sera uniformément répartie à l'intérieur de l'espace (baies modernes) (Idem).

d. Orientation de la fenêtre : la fenêtre orientée vers le sud reçoit une lumière directe tout au long de l'année, tandis que la lumière reçue par une fenêtre orientée nord, est une lumière blanche homogène (Lechner, 2015). Cette dernière est prisée par les artistes peintres pour sa constance (Idem).

e. La couleur des façades : les façades claires augmentant le flux de lumière réfléchi. Ils ont une incidence sur les espaces ouverts des bâtiments du vis-à-vis (Idem). Leur effet est d'autant plus ressenti dans le tissu urbain dense, principalement au niveau des espaces inférieurs des bâtiments et des trottoirs (Idem) (Figure 1-8).

f. La couleur des murs intérieurs : la couleur est utilisée pour réfléchir plus de lumière à l'intérieur d'un l'espace (Idem). Elle permet de diffuser la lumière profondément dans la pièce et éviter d'avoir des espaces trop sombres et un éblouissement dû à un contraste important (Idem).

g. La couleur du plafond : les plafonds clairs principalement blancs, permettent d'augmenter considérablement la quantité de lumière réfléchi à l'intérieur de l'espace. C'est une élément essentiel de l'éclairage de l'espace en profondeur (Idem).

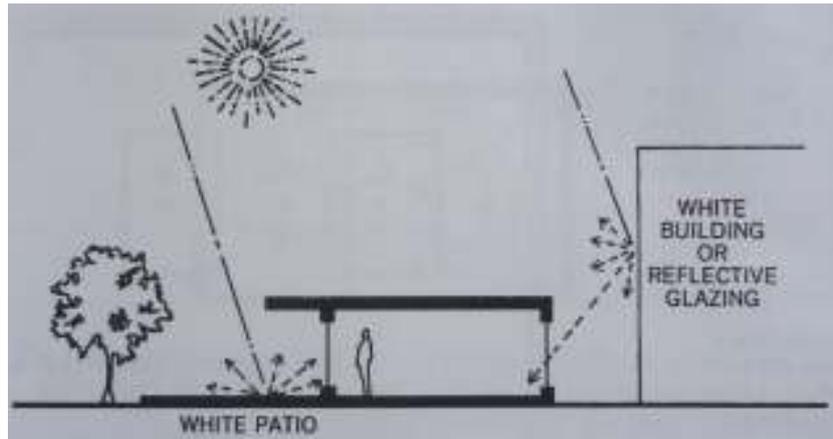


Figure 1-8 Dessin. Influence de la couleur des surfaces extérieures sur le taux de lumière transmis (Lechner, 2015)

h. Le climat : la latitude, les besoins en lumière naturelle et sa disponibilité, représentent des facteurs déterminant dans le fonctionnement global du dispositif d'éclairage (Idem). Dans les pays scandinaves, plus grande est la fenêtre mieux c'est, à cause de la rareté du rayonnement solaire (Boubekri, 2008).

1.3.6 limites des dispositifs d'éclairage naturel

a. Fenêtre latérale : nous pouvons résumer les inconvénients de la fenêtre latérale dans l'éblouissement qu'elle peut provoquer, par la portée réduite qu'elle a, et par la multitude de taches souvent contradictoires qu'il est parfois difficile de combiner. Elle est souvent rattachée à d'autres dispositifs de contrôle (Cf. 1.5 et 1.6) pour optimiser la quantité de lumière reçue.

b. Fenêtre zénithale : Contrairement aux puits de lumière, la fenêtre zénithale permet d'éclairer un seul étage, souvent le dernier (Lechner, 2015). Un mauvais dimensionnement peut être la cause d'un grand gain de chaleur, principalement pendant l'été (Idem).

Le dépôt de poussière est le principal facteur de réduction de la transmission de lumière par les dispositifs zénithaux (Benharket, 2006).

Les fenêtres zénithales n'ont pas l'avantage visuel de la fenêtre latérale. Pour le cas des fenêtres verticales montées en toiture, la lumière est certes meilleure mais il n'existe pratiquement pas de vue sur le ciel (Lechner, 2015).

D'où le besoin de trouver un compromis entre l'optimisation du niveau d'éclairage dans les zones profondes et le maintien d'un niveau constant de confort visuel. Dans ce cas, il est souvent nécessaire de recourir à des appareils d'appoint montés sur la fenêtre, dans le but de permettre un filtrage et/ou une maximisation de la lumière naturelle.

1.4 Filtrage de la lumière naturelle dans l'espace intérieur

Connus également sous le nom de masques solaires, les dispositifs de filtrage représentent l'ensemble des corps qui empêchent le rayonnement solaire d'arriver jusqu'à une surface

habituellement exposée (Reiter et Deherde, 2003). Ces dispositifs de filtrage permettent une atténuation du niveau de flux à l'origine d'un éblouissement ou une surchauffe intérieurs en fonction de leur taille, de leur réflectivité et de leur orientation (Idem).

On peut distinguer plusieurs types de dispositifs filtrant, dont le rôle de certains est de jouer sur l'obstruction ainsi que sur la maximisation de l'éclairage naturel au fond de l'espace.

1.4.1 Persiennes et systèmes aveugles

C'est un des exemples de dispositifs qui absorbent, obstruent, réfléchissent et transmettent le rayonnement solaire (direct et diffus) à l'intérieur du bâtiment, leur effets dépendent de leur formes, inclinaisons, de la position du soleil, de leur position vis-à-vis de la fenêtre et de leur taux de réflectivité (Ruck et al, 2000). Ils sont composés de lamelles horizontales, verticales, ou inclinées, espacées et formant une sorte de baie montée sur la surface intérieure, extérieure ou entre les deux pans d'une fenêtre (Idem). Les lamelles sont soit plates ou inclinées. Les finitions sont faites de métal galvanisé, d'aluminium peint ou ionisé, ou de plastic (PVC) pour les modèles les plus durables (Idem). L'exemple le plus connu est les persiennes vénitiennes.

Ne permettant pas d'avoir une vue dégagée, ils peuvent être la cause d'éblouissement au cours d'une journée ensoleillée, et provoquer une mauvaise perception chez les occupants (Idem).

1.5 Maximisation de la lumière naturelle dans l'espace profond

Les systèmes de contrôle de l'ensoleillement peuvent jouer le rôle de régulateur du flux de lumière incident sur les surfaces larges des fenêtres latérales, même avec des dimensions et des orientations défavorables (Lechner, 2015). En effet, en raison de son intensité, l'ensoleillement direct est dans certains cas exclus du bâtiment (Idem). Ces systèmes ont la capacité de prolonger la portée lumineuse de la fenêtre latérale grâce à leurs surfaces réfléchives (Garcia-Hansen, 2006).

1.5.1 Étagère réfléchissante (light shelf)

C'est un système d'éclairage naturel traditionnel connu depuis le temps des pharaons (Ruck et al, 2000). Cela consiste en une surface réfléchissant la lumière solaire incidente. Il est le plus souvent monté sur une fenêtre afin de permettre à la fois d'éclairer la profondeur d'un espace et d'effectuer une protection contre l'éblouissement provoqué par le rayonnement direct, tout en se plaçant au-dessus du niveau de vision à l'extérieur ou l'intérieur (Ruck et al, 2000, Garcia-Hansen, 2006). En orientant les rayons lumineux vers le plafond, ils permettent d'avoir plus d'uniformité et plus de lumière au fond de l'espace.

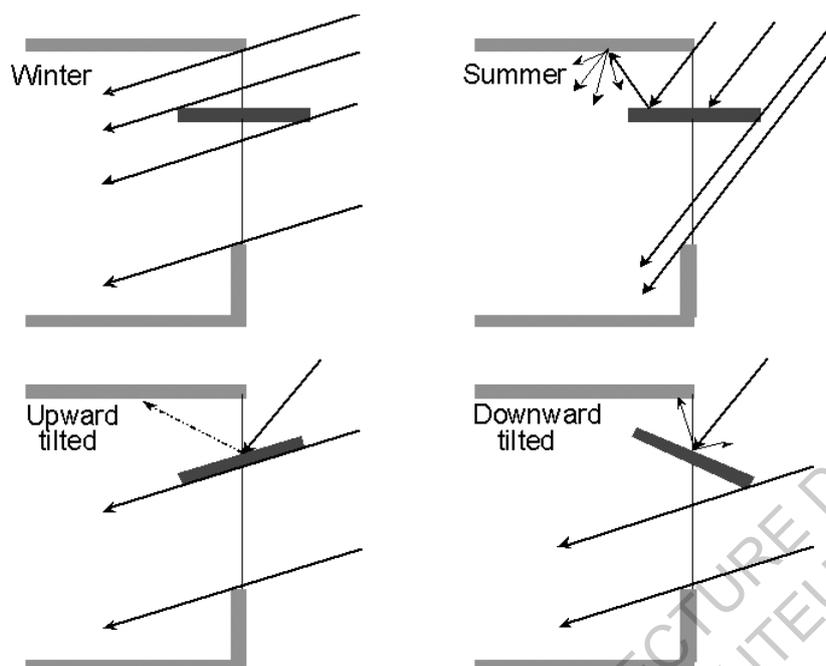


Figure 1-9 Dessin. Les Light shelves (Ruck et al, 2000)

1.5.2 Panneaux prismatiques

Apparus au début du 20^{ème} siècle (Lechner, 2015), les panneaux prismatiques consistent en une fine couche d'acrylique⁵, claire, plate, avec une surface en dents de scie. Ils sont utilisés dans les climats tempérés pour réfléchir ou réfracter la lumière du jour (Ruck et al, 2000). Ils transmettent une lumière diffuse et permettent de contrôler et optimiser le flux lumineux principalement au fond des espaces (Idem). Ils sont montés sur l'ouverture de la fenêtre à l'extérieur, à l'intérieur, ou représenter la surface de transmission elle-même (Idem).

En devenant l'élément de transmission principal installé sur l'ouverture dans la façade, ils ne permettent pas d'avoir une vue sur l'extérieur (Idem).

1.5.3 Les verres défecteurs

Éléments concaves acryliques placés verticalement entre les deux couches d'une baie vitrée, qui permet de réfracter les rayons incidents directs du soleil depuis n'importe quel angle vers le plafond (Idem), celui-ci étant la partie la plus importante qui permet à ce dispositif d'être efficace, donne une lumière plus diffuse et répartie (Idem).

Ce type de verres est monté au-dessus des fenêtres dans le but d'éviter l'éblouissement et les effets directs du soleil (Idem). Ils peuvent également être placés sur les fenêtres de toiture dans le but d'améliorer la pénétration de la lumière dans les atriums et les halls (Idem). Leurs profils dépendent de la latitude. L'angle accepté du soleil varie de 10 à 65° (Idem).

⁵ son nom chimique est : Polymethyl-Methacrylate (PMMA ou PM), il est commercialisé sous le nom de Plexiglass.

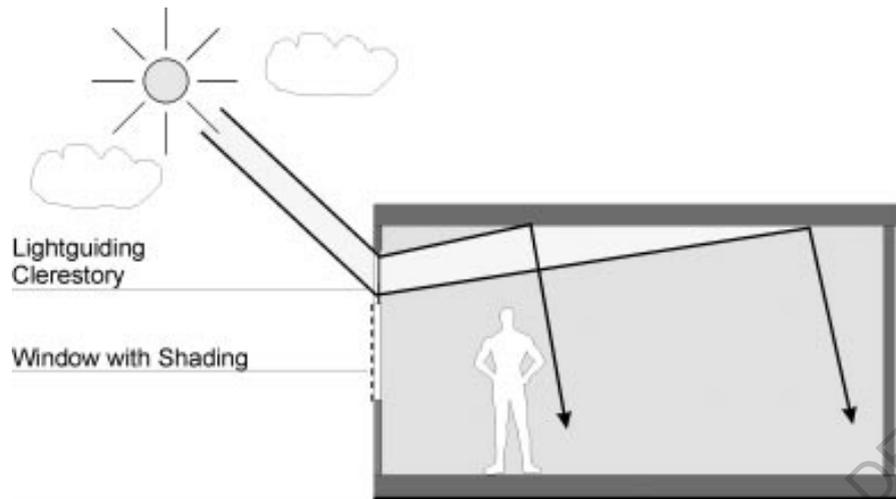


Figure 1-10 Schéma. Verre défecteur monté sur la façade. (Ruck et al. 2000)

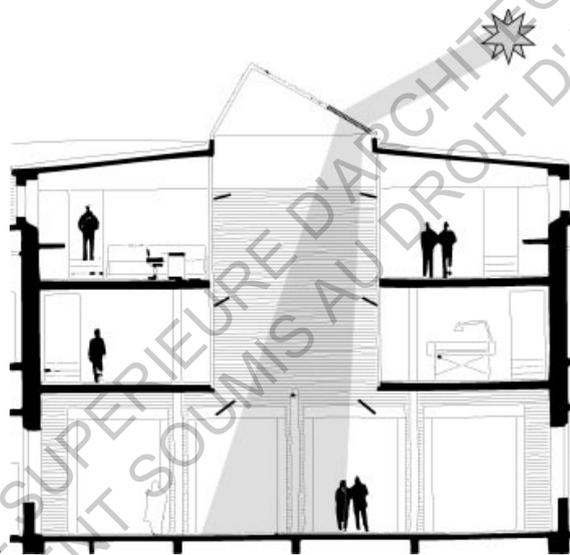


Figure 1-11 Schéma. Verre défecteur monté sur la toiture. (Ruck et al. 2000)

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

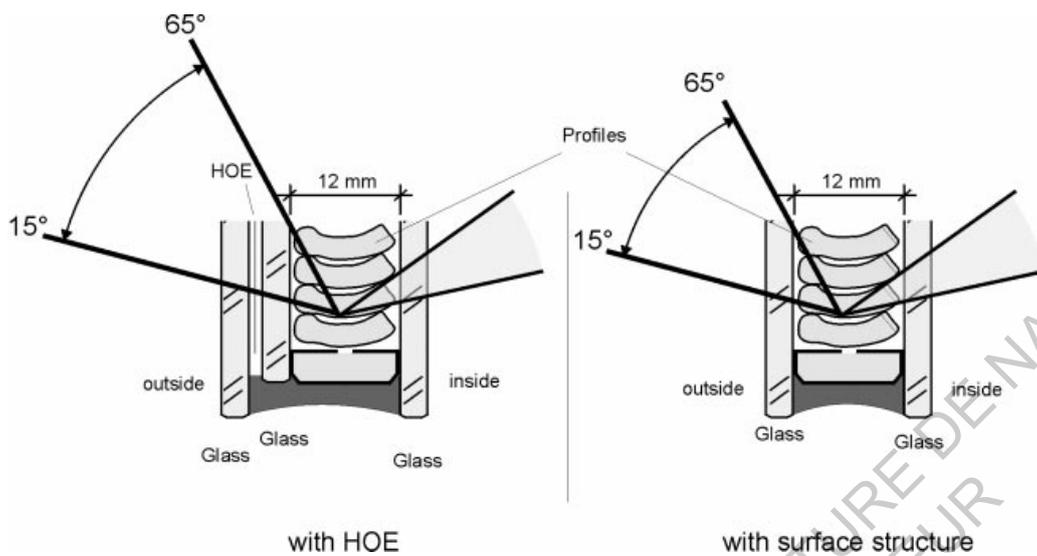


Figure 1-12 Verres défecteurs. Coupe verticale (Ruck et al, 2000)

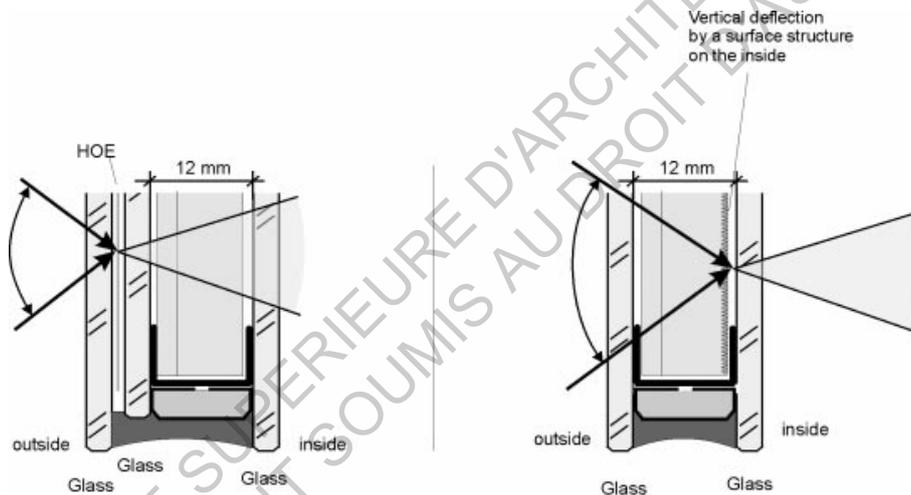


Figure 1-13 Verres défecteurs. Coupe Horizontale (Ruck et al, 2000)

1.5.4 Panneaux coupés au laser (Laser-Cut panel)

Ces systèmes de transmission ont la spécificité d'être produits selon un procédé de découpage au laser qui permet d'avoir des couches extrêmement fines faites d'acrylique (Ruck & al, 2000). En passant au travers, un rayon de lumière subit un phénomène de diffraction (réfraction ensuite réflexion interne totale) (Garcia-Hansen, 2006).

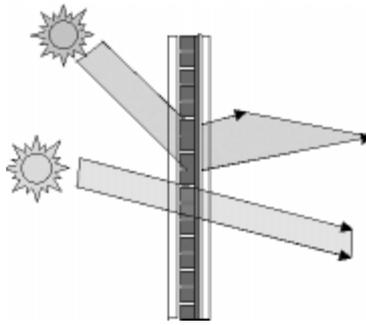


Figure 1-14 : Schéma. Principe de transmission d'un panneau coupé au Laser. (Ruck et al. 2000)

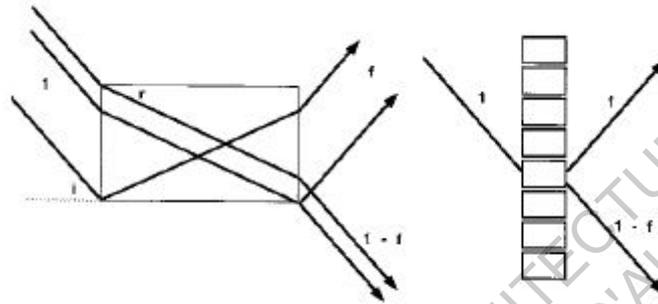


Figure 1-15: Schéma. Diffraction, Laser Cut Panel (Garcia-Hansen, 2006)

Ces panneaux ont l'avantage de diffracter les rayons provenant du soleil, dont l'angle est supérieurs à 45° et inférieurs à 20° , ce qui permet d'avoir une grande quantité de lumière directe contrôlée sans effets d'éblouissement (Idem).

Son épaisseur minimale peut atteindre les 6mm. La diffraction du rayonnement lumineux vers un plafond clair, permet de mieux répartir la luminosité dans l'espace, et avoir plus d'éclairage au-delà de la zone passive.

Ces panneaux ont l'avantage d'être perméables à la vue sur l'extérieur avec un minimum de distorsion de la vue, et flexible de montage, pouvant être installé sous forme de persiennes vénitienes, vitrage de fenêtre, en double vitrage (Ruck et al, 2000).

1.5.5 Autres dispositifs de filtrage et de maximisation de la lumière naturelle

Nous n'avons cité que certains des principaux systèmes utilisés en appoint aux fenêtres traditionnels. En effet, il existe d'avantage de techniques qui s'appuient sur les qualités optiques des matériaux tel que l'acrylique et les surfaces de matériaux polis pour contrôler le flux lumineux direct incident, et optimiser la lumière naturelle dans les espaces profonds comme les systèmes anidoliques⁶.

Les systèmes anidoliques : ce sont des systèmes installés sur le plafond, utilisant les propriétés optiques d'un concentrateur parabolique pour collecter et diffuser la lumière du jour, celui-ci est lié à un conduit de lumière réflecteur qui transporte la lumière collectée vers

⁶ Cf. Ruck et al, 2004, Document 4, « les systèmes de contrôle de la lumière naturelle).

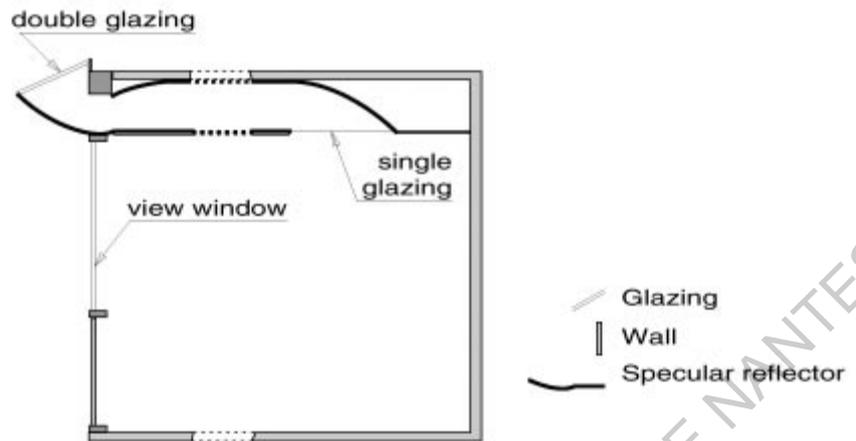


Figure 1-16 Schéma. Système anidolique (Ruck et al, 2000)

l'arrière de l'espace (Idem)⁷. Ce type de dispositif a démontré une meilleure efficacité lumineuse dans des conditions de ciel couvert (Idem).

1.5.6 Limites des systèmes de maximisation de la lumière naturelle

Ces systèmes sont souvent contraints par la forme et l'orientation de l'ouverture et dépendent de la course du soleil. De plus, ils sont considérablement plus efficaces sous ciel clair, et même dans ce cas, le gain en termes de surface profonde éclairée n'est que de quelques mètres. Elle peut dans les meilleurs des cas être prolongée de 5.5 m à 8 m, voir à 10m à partir de la fenêtre latérale (Garcia-Hansen, 2006).

Ainsi, des solutions comme l'augmentation de la taille des fenêtres, la réalisation de seconds jours ou la réalisation d'ouvertures verticales dans la masse des bâtiments (atriums, cours et patios) qui permettent de multiplier la surface des façades exposées et diminuer la profondeur des plans horizontaux, peuvent être envisagées pour ramener une lumière naturelle à des distances éloignées de l'enveloppe extérieure.

Cependant, l'ambiguïté sur les multiples rôles de la fenêtre rend les deux premières possibilités inefficaces (Fontoynt, 2011). De plus, les contraintes souvent programmatiques et le taux de surface de plancher qui peut être perdue par la réalisation d'ouvertures verticales (atrium), fait que la troisième possibilité est moins adoptée par la plupart des maitres d'ouvrages (Plassart, 2015, Garcia-Hansen, 2006).

Par conséquent, pour avoir une bonne répartition de lumière à l'intérieur, les bâtiments sont souvent condamnés à avoir des profondeurs ne dépassant pas les 8 ou 10m (le double de cette distance de façade à façade) et avec l'obligation d'avoir des hauteurs sous plafond hautes (Garcia-Hansen, 2006).

⁷ Cf. G. Courret, *Système anidolique d'éclairage naturel*, PhD, département d'architecture EPFL, 1999

Notre interrogation se situe autour des dispositifs d'éclairage des espaces profonds au-delà des limites conventionnelles de la zone passive. Notre intérêt porte sur l'étude des dispositifs de transport de la lumière à grande distance communément appelés les lumiducs.

1.6 Transport de la lumière naturelle dans l'espace intérieur profond

Avant de parler des dispositifs de transport de la lumière naturelle, il est essentiel de se fixer un contexte général.

1.6.1 Contexte actuel

Dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, la lumière naturelle ne représentait plus un intérêt majeur dans l'éclairage de l'espace architectural intérieur en raison de l'évolution des technologies d'éclairage électrique (Lechner, 2015, Curt Maxey et al, 2008). Cette dernière était abondante, efficace et abordable, d'autant qu'elle était perçue comme supérieure à la lumière naturelle (Lechner, 2015).

La forme intérieure profonde ou peu profonde, s'est alors libérée des contraintes de dimensionnement des ouvertures dans l'enveloppe (Idem). L'éclairage électrique était devenu la solution de facilité pour les concepteurs (Idem).

Cependant, le choc pétrolier des années 1970 a permis de remettre en cause la consommation de l'énergie dès cette époque, notamment l'énergie liée à l'éclairage (Idem). Ce retour forcé à la ressource naturelle, a donc commencé avec une préoccupation solaire aussi bien écologique qu'énergétique, prenant par la suite des dimensions esthétiques, biologiques (Idem).

L'un des soucis majeurs de l'éclairage en architecture, était de suivre cette révolution, et permettre d'avoir un seuil acceptable de lumière naturelle dans les espaces profonds. Ces espaces qui commencent principalement là où la capacité d'éclairage des dispositifs que nous venons de citer s'arrêtent. Cette préoccupation s'est exprimée dans le recours au lumiduc, un dispositif capable à la fois de collecter, transformer, transporter et de diffuser la lumière du soleil à l'intérieur d'espaces particulièrement éloignés de la prise de jour (Rottier, 1972).

Le lumiduc a servi pour l'architecte Guy Rottier dans sa plaidoirie pour à alternative de l'urbanisme moderne, selon lui, pollueur et sans avenir pour l'humanité (Rottier, 1972). Un discours qu'il a tenu à l'occasion du COMPLES⁸ de Marseille en 1972 (Idem). De nouvelles tendances architecturales ont commencé alors à émerger dans cette époque, telle que l'architecture high-tech (Silvestri, 2009), l'architecture écologique (Soleri, 1980, Rottier, 1972,), l'architecture solaire optique⁹ (Bannett, 1983, Soleri, 1980, Lambeth, 1979) ou l'urbanisme solaire (Rottier, 1972), dont le principe en commun déouche sur ce qu'on peut appeler une architecture de captage (Siret, 2013).

⁸Coopération Méditerranéenne Pour L'Énergie Solaire

⁹<http://davidjbennettarchitect.net/architecturehouse.htm>

1.6.2 Le lumiduc contemporain

Utopie ou réalité, aujourd'hui les lumiducs tels que nous les décrivons en détails dans le chapitre 2, ont considérablement évolué tout en restant -pour la plupart- composés des trois parties classiques, c'est à dire: d'un capteur qui collecte le rayonnement incident du soleil depuis la toiture ou la façade (Nair et al, 2013), d'un tube qui transporte la lumière collectée depuis le capteur par réflexion ou par concentration optique, et d'un diffuseur disposé le long du tube ou installé à l'extrémité de celui-ci (Garcia-Hansen, 2006). La longueur du lumiduc est donnée par la longueur de son tube. La composition de ce dernier, définit dans la plupart des cas le type de lumiduc dont il s'agit.

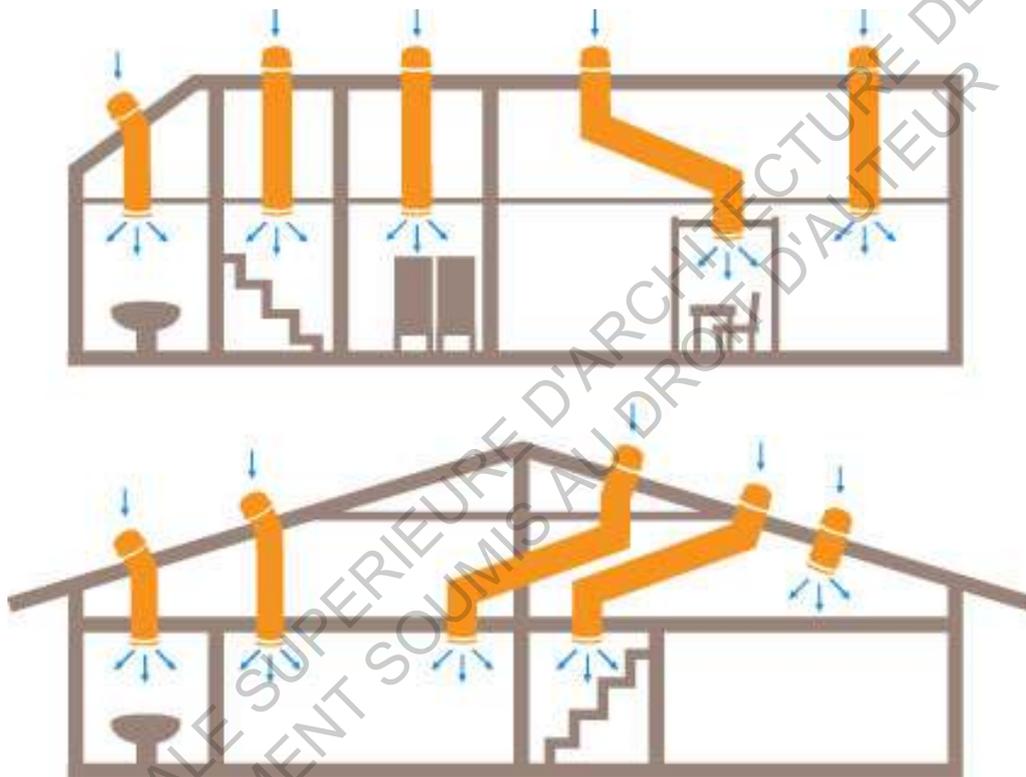


Figure 1-17 Dessin. Principe du Lumiduc (lightwaydaylight.co.uk)

Le tube mesure entre 10m et 25m selon les catégories commercialisées (Mayhoub, 2014). Cette performance dépend de certains paramètres dont : le phénomène d'optique utilisé pour canaliser la lumière, le matériau dont est fabriqué l'intérieur du tube et la capacité du capteur à collecter une lumière directe (Zhang et al, 2001). Le collecteur disposé dans la façade, permet d'avoir une installation longitudinale du tube canalisateur le long du plafond et éclairer une profondeur horizontale, ou depuis le toit et donc éclairer plusieurs planchers superposés. Contrairement aux dispositifs traditionnels comme les fenêtres, les lumiducs permettent d'avoir une lumière naturelle sans gain de chaleur en raison des qualités de filtrages des rayons Infra Rouge que les capteurs possèdent (Curt Maxey et al, 2008).

En même temps, c'est un dispositif qui permet de réaliser une efficacité énergétique dans le poste d'éclairage, si nous savons que la consommation globale dans les bâtiments non

résidentiels est de 37 TWh par an, soit 66% de l'éclairage total et environ 7.9% de l'électricité totale¹⁰.

Son principal inconvénient réside dans l'impossibilité d'avoir une vue sur l'extérieur contrairement aux dispositifs d'éclairage naturel traditionnels. D'autant plus, il n'est performant que par temps ensoleillé (Oakley, 2000).

La question qui se pose est la suivante :

Quels enjeux urbains contemporains le lumiduc permet-il de résoudre en transportant la lumière naturelle dans l'espace profond ? Quelle forme urbaine et architecturale peut-on avoir ?

1.6.3 Contexte urbain contemporain

Les revendications des années 1970 ont évolué sous d'autres noms et avec d'autres objectifs. Aujourd'hui, l'enjeu est celui d'atteindre un développement durable urbain, un développement qui tient sur une bonne gestion des ressources urbaines et environnementales, dont l'une des principales est l'optimisation de la ressource parcellaire (Adam, 2010). Pour cela, la législation urbaine sur la construction vise à augmenter la capacité des parcelles/ ilots à accueillir plus d'espaces et d'usages en permettant une densité urbaine (Adam, 2010, Tribel, 1985). L'objectif derrière est d'atténuer le poids de l'expansion du tissu urbain sur le territoire en réinvestissant les centres des villes et atteindre plus de mixité urbaine.

1.6.4 Densité construite

Densifier est par ailleurs souvent corrélé à des intentions idéalistes visant par exemple à réduire le coût économique de l'urbanisation et de l'impact environnemental causés par l'étalement urbain, à la réalisation d'une ville de courtes distances rapprochant différents services, à la diminution de la dépendance à la voiture...etc. (Idem). De plus, elle interpelle la question de l'efficacité énergétique et environnementale par la réduction des gaz à effet de serre.

En même temps, même si elle représente une revendication des acteurs urbains (élus, législateurs, techniciens), la densité construite est une notion qui souffre d'une mauvaise perception auprès des habitants (Adam, 2010).

1.6.5 Enjeux urbains contemporains

Parmi les enjeux contemporains auxquels font face les villes denses, nous retrouvons l'ombre dans les espaces urbains causée par leur profondeur, et le sens d'évolution de la ville.

¹⁰ ADEM, chiffres clés des entreprises, d'après SOes- NAMEA Energie, édition 2014

En effet, le constat que nous pouvons établir sur le mode vie actuel, démontre qu'une grande partie des gens passent de plus en plus de temps dans des espaces fermés comme les métros, les grands bureaux, les grandes surfaces commerciales, chez eux ou même dans la rue. La congestion des formes urbaines et la pollution atmosphérique liée à l'activité industrielle et urbaine, sont des sources de privation majeures de lumière naturelle dont notre équilibre psychologique et métabolique dépend (Boubekri, 2008). Cette densité construite est souvent révélatrice de formes urbaines compactes qui créaient des profondeurs importantes où la lumière naturelle est devenue un luxe, même dans les journées ensoleillées à l'échelle de la ville qu'à celle de l'espace intérieur.

b. Profondeur verticale aérienne :

Cette notion de profondeur a été exprimée dès l'époque moderne à travers la coupe verticale des bâtiments (Scoffier, 2001) comme nous l'explique *Rem Koolhaas* (dans *New York Délire* en 1978) :

« La confrontation entre programmes antinomiques se déplace de l'horizontale vers la verticale. Les grattes ciels se substituent à la ville, les planchers se substituent au plan... » (Idem)

Autant le sol urbain est optimisé par la superposition verticale des plans devient dense, autant la multiplication de ces formes et leur rapprochement participent à projeter de l'ombre aussi bien dans la rue qu'à l'intérieur des plans larges. Ce phénomène, est en contradiction avec ce qu'est attendu de l'élancement vertical de la forme urbaine de la modernité, censée toujours selon *Rem Koolhaas* réaliser le contraire:

« Plus on monte plus on se rapproche de la nature qui nous offre air et lumière » (Koolhaas, 1978).

L'un des exemples le plus emblématiques de cette profondeur aux effets radicaux sur l'accessibilité de la lumière naturelle, est sans doute le bâtiment d'habitat social connu sous le nom de *Ponté Building* à Johannesburg¹¹. Mesurant 150m de hauteur, son impact est ressenti à l'échelle des espaces intérieurs.

¹¹ <http://www.messynessychic.com/2013/04/08/anywhere-but-here-ponte-tower/>)



Figure 1-18 Photographie, Ponte Building, Johannesburg¹²



Figure 1-19 Photographie, Ponte Building, vue depuis le sommet Johannesburg¹⁰

Sur l'échelle urbaine, l'exemple du quartier de Manhattan à New York nous illustre les effets de la profondeur verticale sur la rue.

¹² <http://www.messynessychic.com/2013/04/08/anywhere-but-here-ponte-tower/>



Figure 1-20 Photographie, ombre portée sur les niveaux inférieurs, Manhattan, New York. (nyhabitat.com)

c. Profondeur souterraine

Au même moment, le développement de la coupe urbaine a également pris le sens de la profondeur du sol. En effet, nombre de théoriciens à côté de G. Rottier, et D.J. Bannett (pionnier de l'architecture optique et souterraine aux Etats Unis dès les années 1970) ont eu des théories sur l'urbanisme souterrain, notamment E. Utudjian (1966), un des précurseur de l'architecture et l'urbanisme souterrains. Celui-ci considérait que la ville prenait en profondeur dans les deux sens horizontal et vertical :

« l'univers urbain se développe à trois dimensions : en surface, en hauteur et en profondeur... l'urbanisme souterrain permet de créer la troisième dimension de développement de la ville »(Utudjian, 1966)

Ainsi, l'accessibilité à l'espace profond souterrain était déjà possible avant l'avènement du lumiduc. En même temps, cet espace n'était jamais destiné à être utilisé pour construire de l'habitat, mais uniquement à des usages encombrants et/ou polluants pour la ville en surface (Soleri, 1980, Rottier, 1972, Utudjian, 1966). A l'unanimité, ces théoriciens estiment que l'habitant ne supportera pas de vivre dans de telles conditions d'enfermement :

« L'homme est un animal du soleil » (Soleri, 1980), *« l'habitat de l'homme se trouve en surface là où l'air, la lumière et le paysage sont »* (Utudjian, 1966).

1.6.6 Ambiance des espaces profonds souterrains

Un rapport d'étude de l'ANR¹³ sur la perception des espaces souterrains permet d'apporter certaines affirmations de ces idées d'avant-garde, notamment sur les effets d'enfermement ressentis (Derlande, 2014). Sur la base d'images prises dans des situations différentes (espaces souterrains, couleurs d'éclairage différentes, de surface de l'espace...etc), l'étude démontre que plus il y a de lumière, plus un sentiment de sécurité est ressenti. Quant à l'ambiance, elle a été décrite comme désagréable et oppressante, provoquée par le sentiment d'enfermement dans la plupart des commentaires des personnes interrogées. A côté de la quantité de lumière disponible, sa qualité était un élément de définition de l'ambiance perçue dans ces espaces (Idem).

Même si nous savons que traditionnellement le jeu d'ombres et de lumière naturelle est une composante essentielle de la perception du temps et du climat dans l'espace intérieur (Von Meiss, 2012), beaucoup d'espaces souterrains n'ont pas d'accès à la lumière naturelle (Chelkoff, 1995). Une autre étude permet de mettre l'accent sur la perception du temps dans l'espace souterrain en prenant le cas de la station de métro du musée du Louvre à Paris (Idem). L'étude démontre que les repères temporels des usagers de cet espace, ne dépendent pas des fluctuations traditionnelles de la lumière naturelle, mais de la mise en tension du regard d'une part entre les dispositifs spatiaux et lumineux artificiels, et le mouvement des gens d'autre part (comportement, taux de fréquentation...etc) (Idem).

Dans ces espaces, le son et principalement la réverbération provoqués par cette fréquentation, par l'ouverture ou la fermeture des commerces, ainsi que la situation particulière d'une heure de la journée, sont les seuls marqueurs de temporalité de ces espaces (Idem). En rupture avec le climat extérieur, la dimension temporelle est provoquée par une mise en scène artificielle (Idem).

Un troisième aspect de définition de l'ambiance dans ces espaces est l'absence de vue sur l'extérieur (Derlande, 2014), c'est d'autant plus vrai avec les galeries souterraines de métro. En effet, la vision sur l'environnement extérieur depuis un espace intérieur est un facteur déterminant au même titre que le spectre de lumière naturelle dans la diminution de la fatigue des yeux et dans la qualité de l'ambiance visuelle (Boubekri, 2008, Reiter et Deherde, 2003). L'effet est tel, qu'avoir une ouverture permettant de percevoir l'environnement extérieur depuis son poste de travail, est une exigence inscrite dans le code du travail¹⁴.

1.7 Problématique

Un paradoxe qui nous paraît évident est celui où la densité optimise l'espace urbain d'une part et se traduit par des plans larges et des formes profondes qui jettent de l'ombre à

¹³ Voir (Derlande et al, 2015, 2014). L'étude comprend deux tranches : l'influence de l'éclairage sur la perception des espaces souterrains par les usagers, et une deuxième sur l'amélioration de l'éclairage de l'acceptabilité des espaces souterrains.

¹⁴ Lettre circulaire DRT n°90/11 du 28 Juin 1990.

l'intérieur comme à l'extérieur de la forme bâtie d'autre part. De plus, comme nous l'avons cité au début, la densité est une notion qui souffre d'une mauvaise perception chez les habitants (Adam, 2010, Tribel, 1985). En même temps, elle est toujours recherchée par les acteurs urbains (Adam, 2010). D'un point de vue technique, nous avons vu la capacité du lumiduc à éclairer les espaces fermés profonds, supposant une relation nouvelle entre la forme urbaine profonde et l'accessibilité de l'éclairage naturel. La lumière transportée du lumiduc nous amène à supposer que la perception de la temporalité du climat à l'intérieur de l'espace éclairé est un atout pour l'espace profond (souterrain). En même temps, une des limites majeures du lumiduc est qu'il ne permet pas d'avoir une vue qui accompagne cette lumière naturelle.

Ainsi, nous souhaitons comprendre l'impact du lumiduc sur la transformation de la forme intérieure urbaine dense. Nous distinguons alors six axes que nous sommes en mesure de développer dans notre recherche :

1. Concept du lumiduc
2. Efficacité lumineuse du lumiduc
3. Qualité de la lumière transmise par le lumiduc
4. Ambiance lumineuse associée au lumiduc
5. Efficacité énergétique du lumiduc
6. Paysage urbain et image de la ville du lumiduc

1.8 Méthodologie

Après une présentation du thème global de l'accessibilité de la lumière naturelle dans l'espace intérieur construit au chapitre 1, nous développerons notre recherche sur quatre autres chapitres :

Chapitre 2 : Etat de l'art historique : il consistera à établir une étude chronologique afin de démontrer les origines et l'imaginaire derrière l'idée de canalisation de la lumière. Ensuite, nous exposerons l'imaginaire sur le lumiduc dans la science-fiction, dans la littérature ainsi que dans les projets utopiques urbains qui l'ont utilisé. Enfin, déterminer les précurseurs du lumiduc contemporain.

Chapitre 3 : Etat de l'art technique : Nous nous référons aux revues scientifiques depuis la fin des années 1980 jusqu'à aujourd'hui. Ce chapitre nous permettra de traiter les cinq premiers axes qui vont nous être utiles pour le chapitre qui suivra :

Concept du lumiduc, l'efficacité lumineuse du lumiduc, la qualité de la lumière transmise par le lumiduc, l'ambiance lumineuse associée au lumiduc, l'efficacité énergétique du lumiduc.

Chapitre 4 : Lumiduc et forme urbaine : nous effectuerons une étude prospective sur l'aspect de la forme profonde éclairée par un lumiduc en effectuant une analyse paramétrique et une autre thématique, nous nous aiderons de schémas explicatifs pour expliciter nos propos. Ceci nous permettra de :

- . Comprendre l'intégration du lumiduc à la forme architecturale
- . Déterminer le lien entre le lumiduc et la forme de l'espace éclairé, ainsi qu'entre le lumiduc et les différents aspects de la forme (rue, façade...etc)
- . les effets du lumiduc sur la forme architecturale et urbaine.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2 Chapitre 2. Lumiduc : de l'utopie au réel

2.1 Idée de canalisation de la lumière dans l'histoire

2.1.1 Il y a 5000 ans, les miroirs réflecteurs dans l'Égypte antique

Dans la mythologie égyptienne, le soleil occupait une place importante dans la construction des édifices religieux (Hobday, 2006).

Une hypothèse prétend que les égyptiens ont utilisé la succession de miroirs réflecteurs fait de bronze pour canaliser la lumière au fond des tombeaux (Gordon, 2016). Les peintures et les écritures sur leur murs et plafonds se trouvant dans un parfait état de conservation et sans trace de souille ni de résidus, nous laisse croire que c'est à cette hypothèse (Idem). En effet, les égyptiens se servaient de lampes à combustion pour s'éclairer.

Cette hypothèse n'est ni démentie ni confirmée à croire Franck Gordon, chercheur du CIRAC (Idem). Celui-ci note que dans le cas de miroirs (argentés) ayant servi pour éclairer les tombes profondes, la lumière naturelle ne pouvait être réfléchi qu'à hauteur de 40%. De plus, elle s'épuisait au bout de quelques mètres¹⁵ (Figures 2-1 et 2-2).

Une deuxième trace de l'utilisation d'un rayonnement solaire différé, est attachée à la croyance du dieu soleil Ra, où la disposition des formes intérieures (galerie, escalier, niche), et l'orientation des ouvertures, permettaient de perpétuer une mise en scène quotidienne symbolisant le combat des dieux aux côtés du pharaon (Cenival, 1964).

Ainsi, la disposition des éléments intérieurs de la forme et l'usage des outils réfléchissants la lumière naturelle à l'intérieur, avaient eu leur part dans le jeu conceptuel de la forme architecturale¹⁶.

2.1.2 En 212 A.J. les miroirs ardents d'Archimède

Anthémius, un mathématicien byzantin du 6^{ème} siècle, avait décrit des miroirs ardents (Figure 2-3) qu'Archimède avait imaginé pour essayer de brûler les navires romains lors de leur siège en 212 A.J. sur la ville grecque de *Syracuse*, par la concentration du rayonnement solaire au moyens d'une parabole (Une société de gens de lettres, 1778). Il avait proposé une description de cette idée en mettant un système de paraboles concentratrices qu'il nomma : « *machine capable d'incendier à un lieu donné, distant de la portée d'un trait, par le moyen de rayons solaires* » (Idem).

¹⁵ CIRAC.org

¹⁶ Pour plus de détail sur l'ambiance lumineuse et la forme architecturale dans les temples égyptiens, consulter : **Eric Aubourg et Pierre Zignani**, *Espace et composition architecturale au temple d'Hathor à Dendarah*, Bulletin de Institut Français d'Archéologie Orientale IFAO, tome 100, le Caire, 2000.

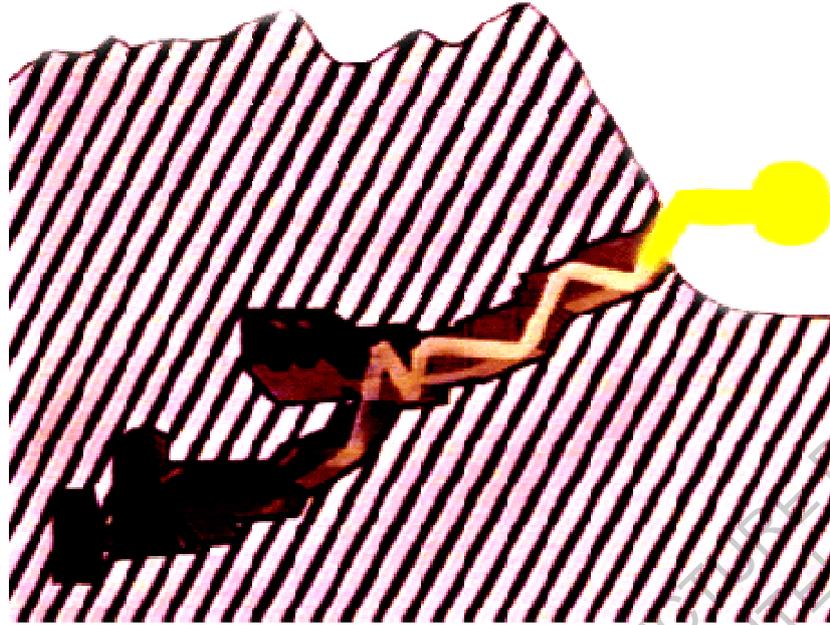


Figure 2-1 Dessin. Canalisation de la lumière dans une tombe égyptienne¹⁷

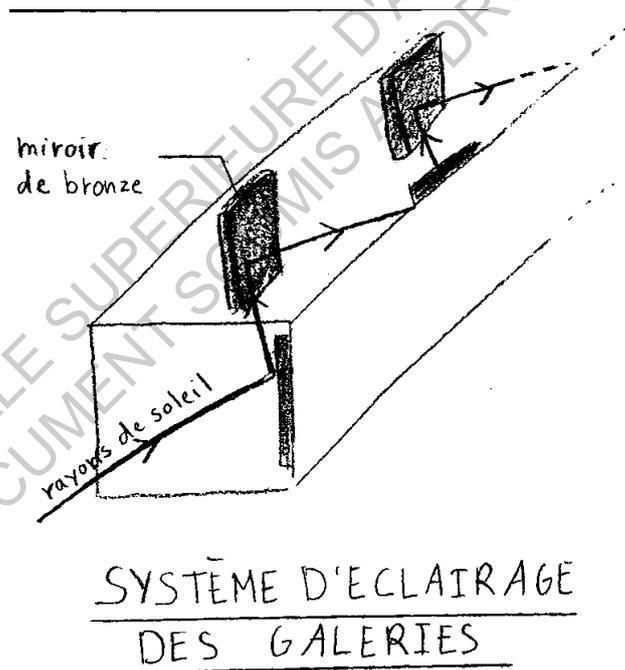


Figure 2-2 Croquis. Multireflexion de la lumière dans les tombes égyptiennes¹⁸

¹⁷ ldi5.com

¹⁸ Dessin dans le carnet de voyage d'un touriste réalisé à partir des descriptions de son guide, à la vallée des rois à Louxor : reves-d-ailleurs.com/pages/mes-carnets-de-voyage/egypte/



Figure 2-3 Miroirs ardents d'Archimède. (Wikipédia)

Néanmoins, son expérimentation a été très contestée en raison de la manière fautive dont il expliquait la fabrication des miroirs d'une part, et de la transmission de la lumière d'une autre part (Manfroid, 2013).

En effet, le cône lumineux réfléchi par un miroir concave à une centaine de mètres de focale, serait étalé sur une surface de plusieurs dizaines de centimètres. De même que pour un petit miroir parfaitement plan, pour créer une flamme, l'énergie réfléchie doit être intensément concentrée sur un point précis (Idem).

Par ailleurs, même si certains historiens plus contemporains admettent qu'Archimède ait bien imaginé un miroir ardent pour brûler les voiles de la flotte romaine, la précision optique de ces miroirs de bronze n'aurait pas permis de contrôler un faisceau lumineux d'une grande distance (Payard, 1844), ceci relève d'une grande technicité qui n'était pas encore accessible :

« .. La réalisation de si grands miroirs, aussi parfaits et rigides, tout en étant assez légers pour être aisément manipulés était évidemment impossible à l'époque d'Archimède. » (Manfroid, 2013)

Même si Archimède les a imaginé et qu'Anthémius les a approximativement reproduit, les Grecs n'ont jamais pu développer de technologie capable de contrôler le flux lumineux solaire avec du cuivre poli (Butti et Perlin, 1980). Le bouleversement allait venir beaucoup plus tard dans l'histoire.

2.1.3 Au 11^{ème} siècle, les miroirs ardents d'Ibn Al-Haytham (Alhazen)

Ibn Al-Haytham ou Alhazen (965-1040) savant arabe du moyen âge, célèbre pour son traité sur l'optique, découvrit les miroirs ardents d'Archimède qu'il considérait comme « *la plus noble des géométries reçu des anciens temps* » (Butti et Perlin, 1980).

Avant de donner une explication mathématique au fonctionnement du dispositif, d'Ibn Al-Haytham (Alhazen) reprochait aux Grecs de ne pas en avoir suffisamment donné les preuves (Idem).

Contrairement à Anthémius, d'Ibn Al-Haytham (Alhazen) a démontré la faisabilité des miroirs ardents à travers l'usage des lois de l'optique dont il est le fondateur (Idem), ce qui lui a permis de prévoir la manière dont était réfléchi la lumière du soleil sur un miroir pour la première fois dans l'histoire (Idem).

Ce n'est qu'au 13^{ème} siècle en Europe, que fut construit pour la première fois dans l'histoire un miroir ardent opérationnel et performant, permettant de contrôler le flux lumineux provenant du soleil et reproduire le résultat attendu par Archimède, comme l'illustrent les Figure 2-4 et 2-5 dans le contexte militaire des croisades en Terre sainte (Idem).



Figure 2-4 Peinture. Miroir ardent d'Archimède, peint en 1600.
Galleria degli Uffizi, Florence, Italie (Wikipédia)



Figure 2-5 Frontispice. Usage des miroirs ardents.
Traité d'optique d'Ibn Al-Haytham (Alhazan).
(Butti et perlin, 1980, p. 31)

C'est ainsi que les spéculations métaphysiques anciennes ont cédé la place à la science empirique des lois de l'optique dans la manipulation du flux lumineux solaire (Idem). L'apport d'Ibn Al-Haytham (Alhazen) va marquer considérablement la période de la renaissance, où l'usage du rayonnement solaire a pris un tournant historique (Idem).

Jusqu'au 19^{ème} siècle, le flux capturé de chaleur avait pour la plupart du temps servi à optimiser la production horticole et la production d'eau chaude (Idem). Il faut attendre longtemps avant de voir apparaître un intérêt pour l'usage du rayonnement solaire capturé dans l'éclairage des espaces intérieurs.

2.1.4 En 1841, la fontaine lumineuse de Jean-Daniel Colladon

Jean-Daniel Colladon (1802-1893) un physicien suisse, était professeur à l'université de Genève (Johnson, 2004). Dans un cours de dynamique des fluides, il s'est servi de la lumière du soleil pour démontrer le voyage possible de la lumière dans un parcours non rectiligne (Idem).

Pour ce faire, il a monté un vase de forme parallélépipède qu'il a rempli d'eau et équipé de diaphragme permettant d'avoir un jet. Sur le même axe de ce diaphragme, dans le côté opposé, se trouve une ouverture adaptée à une lentille convexe par où provient un flux lumineux solaire, le tout mis dans une chambre noire, relié à la lumière du soleil par un tube équipé d'un miroir réfléchissant les rayons solaires à l'intérieur de ce tube. Les expérimentations scientifiques de cette époque utilisaient la lumière réfléchie du soleil pour sa constance (Idem) (Figure 2-6).

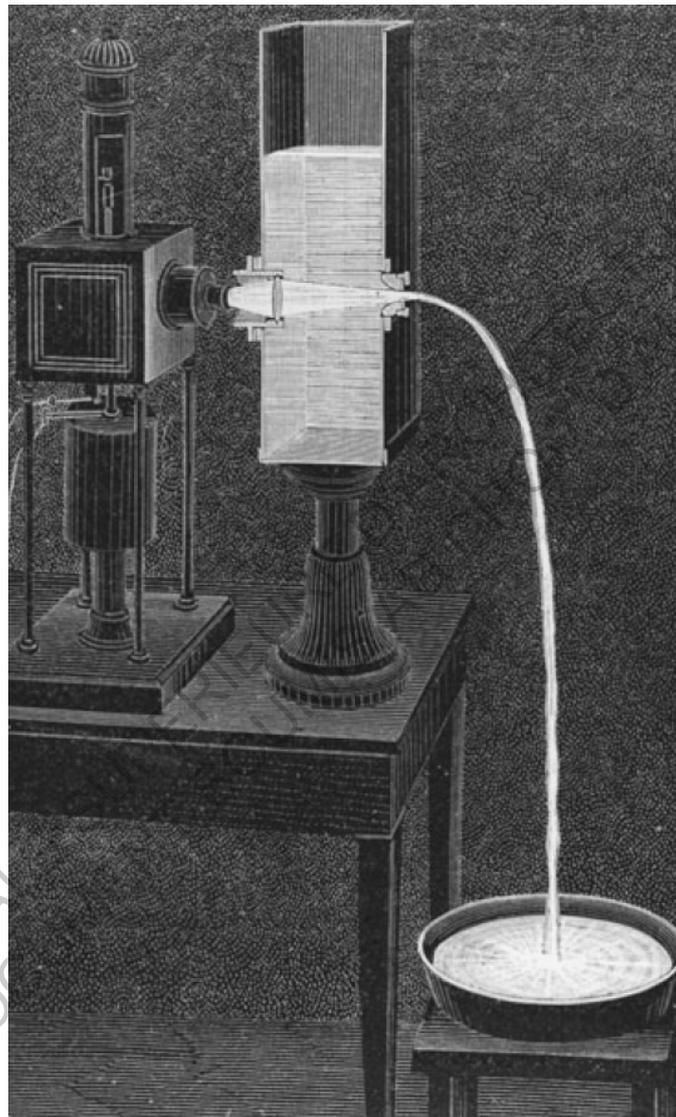


Figure 2-6 Dessin de la Fontaine lumineuse de Colladon
(Daniel Colladon, "La Fontaine Colladon," *La Nature*, 2ème semestre 1884, p.325)

La lumière transportée dans le tube ensuite traversant la lentille, est ensuite diffusée dans le liquide pour converger vers le diaphragme à travers lequel s'écoule l'eau du vase (Colladon, 1842). Cette lumière est transformée en étincelles d'eau dès qu'elle rencontre une surface solide (Idem). Dans son compte rendu, Colladon décrit son expérimentation ainsi :

« ...Si la veine tombe d'une grande hauteur...elle se réduit en goutte dans sa partie inférieure, c'est là seulement que le liquide s'éclaire, et chaque point de rupture de la veine lance une vive lumière. » (Idem).

D'un côté il a pu transporter la lumière en réfléchissant les rayons lumineux du soleil jusqu'au vase d'eau à travers un tube noirci par le phénomène de réflexion spéculaire (Idem). D'un autre, il a démontré que la lumière qu'on croyait suivre uniquement une ligne droite pour se déplacer, pouvait être 'configurée' pour suivre une courbe (Johnson, 2004).

En 1841 Auguste de la Rive un physicien suisse (1801-1873) a dupliqué dans ses cours de physique à l'Académie de Genève, l'expérimentation de Colladon en utilisant une lampe électrique fonctionnant à l'arc (Forget, 2010).

2.1.5 En 1842, La canalisation de la lumière dans un liquide (J. Babinet)

Jacques Babinet (1794-1872) est un physicien français connu pour ces contributions dans le domaine de l'optique. Il explique en 1840 dans une lettre publiée ensuite dans les Comptes-Rendus de l'Académie des sciences deux ans plus tard, une expérience qu'il avait réalisée au Collège de France à la Société Philomathique, qui consistait à concentrer une bougie sur le fond d'une carafe depuis laquelle coulait un mince filet d'eau dans un vase en porcelaine ou sur un papier (Babinet, 1942). Il remarque que la lumière y est guidée le long du filet d'eau par phénomène de réflexion interne totale qui consiste à emprisonner la lumière à l'intérieur du liquide, de la même manière même que l'avait fait remarquer Colladon (Idem). Babinet décrivant l'expérience :

« La lumière de la bougie ... devient manifeste quand celui-ci (le filet d'eau) se brise sur la porcelaine ou sur le papier. » (Idem)

Il rajoute que la lumière est non seulement transportable par phénomène de réflexion totale interne d'un point A (la bougie) à un point B (la porcelaine) dans une direction rectiligne, mais elle peut aussi suivre des chemins en courbes (quelconques) :

« ...ce moyen de porter l'illumination dans une direction non rectiligne réussit très bien avec une tige de verre courbée d'une manière quelconque... » (Idem)

Ces observations sur le déplacement de la lumière naturelle dans un milieu, vont mener plus tard à l'invention de la fibre optique et l'application dans les domaines des télécommunications et de la santé (Hecht, 1984).

2.1.6 En 1843, l'héliostat de J. T. Silbermann

Le flux lumineux du soleil ne suffisait pas toujours à fournir un niveau constant de lumière naturelle pour mener à bien toutes les expériences. C'est pour cette raison qu'au 18^{ème} siècle on imagina des miroirs montés sur des socles rotatifs, afin de compenser le

mouvement du soleil, ces dispositifs sont alors appelés Héliostats. Le premier modèle pratique était inventé en 1827¹⁹.

Jean Thibault Silbermann (1806- 1865), physicien français, était le conservateur des Collections du Conservatoire Nationale des Arts et Métiers à Paris. En 1843, il présenta l'héliostat qui va porter son nom à l'Académie des Sciences. L'héliostat de Silbermann²⁰ (Figure 6 et 7), assurait l'éclairage continu tant recherché dans les expériences d'optique. Il était resté le modèle le plus abouti et le plus précis jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle²¹.

Posé sur trois pieds en guise de cales, il est constitué d'une horloge et d'un miroir pouvant être programmé dans une latitude donnée pour suivre la course du soleil. Il permettait de lire sur des règles graduées à la fois les minutes, l'heure, et déterminer le jour de l'année²².



Figure 2-7 photo de l'Héliostat de Silbermann²³

¹⁹ L'héliostat de Silbermann. http://rhe.ish-lyon.cnrs.fr/instruments-scientifiques/instr_opt_heliostat.html

²⁰ Idem

²¹ <https://www.youtube.com/watch?v=Ywy4LgXHY78#t=71>.

²² Idem

²³ http://rhe.ish-lyon.cnrs.fr/instruments-scientifiques/instr_opt_heliostat.html



Figure 2-8 Photo de l'héliostat de Silberman, monté sur une fenêtre²⁴

2.1.7 En 1854, la fontaine lumineuse et J. Tyndall

John Tyndall (1820-1893) est un physicien Irlandais, membre de l'Institut Royal de Londres, il avait répliqué l'expérimentation de canalisation de la lumière dans un jet d'eau descendant depuis un réservoir. Après suggestion de Michael Faraday son collègue à l'institut Royal (Hecht, 1999), il a refait l'expérimentation de Colladon et de Babinet dans le but de démontrer le comportement de la lumière lors du voyage de celle-ci entre deux milieux, dont les indices de réfraction sont différents (Idem).

Faraday avait le souvenir de cette expérimentation depuis son voyage en 1840 à Genève mais à défaut d'avoir une bonne mémoire, il avait oublié l'auteur d'origine qui n'est autre que Colladon (Idem). Présentant son expérimentation devant l'Institut Royal de Londres, Tyndall avait placé un tube de verre dans un côté d'un réservoir, et grâce à une valve, permettait à l'eau de couler. Décrivant son expérimentation en 1854, Tyndall écrit :

²⁴ http://rhe.ish-lyon.cnrs.fr/instruments-scientifiques/instr_opt_heliostat.htm

« Merci à la réflexion interne totale. (La lumière) semble être lavée dans la partie basse par le liquide descendant, ce dernier étant ainsi amené à présenter une belle apparence lumineuse ». Tyndall. (Hecht, 1999).

Par conséquent, la fontaine lumineuse a été attribuée à tort J. Tyndall au début du 20^{ème} siècle (Idem).

2.1.8 En 1853, La fontaine lumineuse à l'Opéra de Paris

L'opéra de Paris avait fait installer une fontaine lumineuse pour créer des effets lumineux scénographiques dans les « *Scènes de Faust de Goethe* ». Le dispositif consistait en une lampe installée le long d'un tube rouge en verre rempli d'eau, représentant le personnage de « *Mephistopheles* » qui crachait du feu (Johnson, 2004).

Cette utilisation dans le domaine artistique représente une première dans le transport de la lumière par réflexions optiques, après avoir été exclusivement réservé aux expérimentations scientifiques (Hecht, 1999).

2.1.9 En 1880, Le photophone d'Alexander Graham Bell

L'ingénieur et inventeur Anglo-canadien (1847-1922) Graham Bell avait inventé le téléphone en 1876, mais n'était pas satisfait du signal transporté par les câbles. Il avait alors pensé à un chemin qui ne dépendait pas des obstacles physiques : la lumière naturelle (Hecht, 1999).

En 1880 il invente le photophone : un appareil de transport du signal sonore par modulation du flux lumineux (Graham Bell, 1880).

L'appareil consistait en un premier miroir réfléchissant le rayonnement solaire sur un autre miroir relayé à un tube duquel provient la voix d'une personne. Entre les deux, une lentille est placée pour collimater le rayonnement lumineux transmis (Figure 2-9). Le miroir fluctué par les ondes de la voix de l'émetteur, transmet des signaux lumineux à une parabole (Figure 2-10) qui se trouve sur le même axe, à travers une autre lentille placée à mi-chemin. Le flux lumineux modulé est concentré au cœur de la parabole sur une cellule de silicium (Idem), qui assure la conductibilité suivant l'intensité de lumière du signal (Hecht, 1999). Ce signal est alors converti en un son audible utilisant un récepteur téléphonique ordinaire.

Le premier essai a permis de transférer le son sur une distance de 200m. Cependant, il reste dépendant de l'état du climat (nuages, pluie ...etc.) et des obstacles entre les réflecteurs et les récepteurs. Graham Bell, en décrivant la scène à son père avait écrit :

« J'ai entendu des paroles articulées par la lumière du soleil ! J'ai entendu un rayon du soleil rire et tousser et chanter ! ... J'ai été capable d'entendre l'ombre

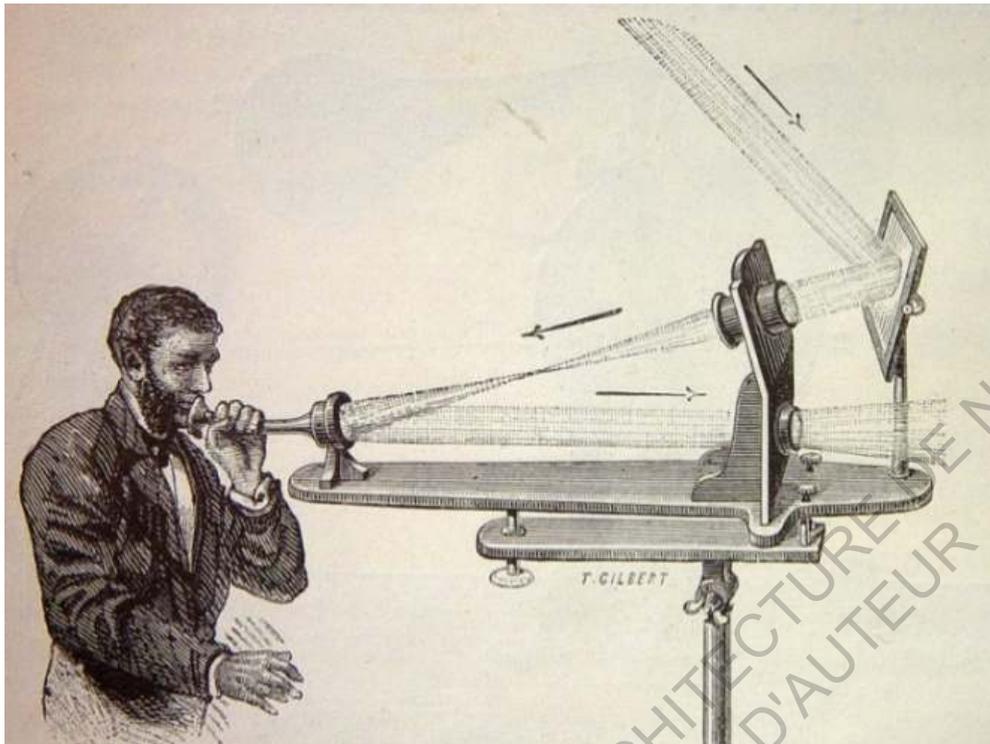


Figure 2-9 Dessin du photophone d'Alexander Graham Bell (up-magazine.info)



Figure 2-10 Dessin. le photophone d'Alexander Graham Bell (up-magazine.info)

et j'ai même aperçu par mes oreilles le passage d'un nuage le long du disque du soleil »²⁵

Une fois de plus, l'usage du captage du rayonnement solaire dépasse la simple idée énergétique ou lumineuse pour atterrir dans le domaine du transport du son. Nous voyons ainsi l'usage et la manière dont l'évolution des techniques de contrôle et de canalisation du rayonnement solaire s'effectue selon les domaines.

2.1.10 En 1881, l'appareil d'éclairage des maisons de William Wheeler

W. Wheeler (1851–1932) est un ingénieur américain diplômé en 1871 de l'université du Massachusetts (Hecht, 1999). Après un voyage au Japon, Wheeler revient chez lui à Boston en 1880 (Hecht, 1984). Une des questions qu'il s'est mis à résoudre était le transport de lumière exactement de la même manière que le gaz ou l'eau à l'intérieur des maisons (Idem). Il dépose un brevet d'un modèle qu'il nomme *appareil d'éclairage des maisons et d'autres structures* en Décembre 1881, qu'il obtint en Septembre 1881 (Figure 2-11). A l'époque, l'ampoule électrique n'était pas aussi répandue (Idem).

Wheeler explique dans son brevet que la lumière qu'il souhaite transporter dans des tubes est générée par dynamos électriques, l'arc voltaïque étant beaucoup plus économique que d'autres sources de production de la lumière (Wheeler, 1881). Néanmoins, il affirme que le système est adapté à n'importe quelle source de lumière, et il suffirait de changer certaines pièces spécifiques de son appareil.

Les tubes qu'il décrit sont faits de verre dont les parois sont couvertes à l'extérieur par un film argenté et d'une couche d'asphalte pour prévenir les égratignures et le ternissement. Il a prévus des lentilles dans le tube et des verres en oblique dans les coudes de manière à réfléchir une lumière droite, à optimiser le transfert et à minimiser les pertes d'efficacité à mi-chemin (Idem). On peut lire dans le brevet déposé par Wheeler:

« N'importe quelle quantité désirée d'énergie productrice de lumière employée, est convertie en vibration de lumière dans un espace central ou singulier duquel elle est transmise et distribuée au nombre d'espaces que l'on souhaite éclairer par conduction optique, par dispersion et par division de la lumière » (Idem).

Nous pouvons émettre l'hypothèse que la découverte de l'ampoule électrique un an plus tôt en 1879 par Thomas Edison, a mis au ralenti jusqu'à faire oublier cette invention²⁶, même si nous la retrouverons plus tard dans des événements d'ampleur internationale, en l'occurrence l'exposition internationale de santé de Londres, l'exposition universelle de Paris

²⁵ Le texte original en anglais est paru dans : « *Alexander Graham Bell Made a Wireless Phone That Ran on Sunshine*, Ben Richmond, parus dans *Motherboard.vice.com.fr*, 2014»

²⁶ De plus, la qualité de lumière que produisait un arc électrique était très faible si bien qu'en l'augmentant, l'appareil ne serait plus rentable. Ce sont là certaines des raisons qui ont mené à ce que l'appareil de Wheeler n'ait pas évolué bien que le concept ait largement été exploité par la suite.

et celle de Chicago (Hecht, 1999). En effet l'ampoule électrique allait devenir une solution beaucoup plus efficace pour l'éclairage des espaces intérieurs.

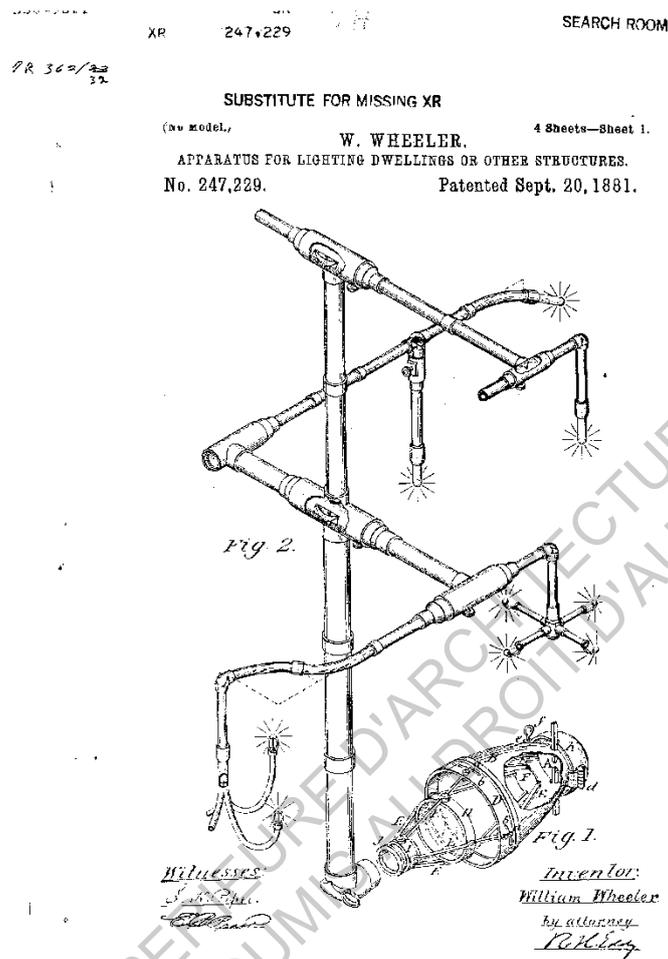


Figure 2-11 Dessin de l'appareil de conduite de lumière à l'intérieur d'une maison à deux étages. Wheeler (Wheeler, 1881)

2.2.11. En 1884, Exposition Internationale de Santé de Londres

Les fontaines lumineuses ont pris une plus grande échelle dans l'exposition internationale de santé de Londres. La lumière (électrique) était un symbole du progrès technologique de cette époque (Hecht, 1999). L'ingénieur en chef du réseau d'approvisionnement en eau potable de Londres Francis Bolton a installé une fontaine lumineuse géante pour symboliser la pureté de l'eau distribuée dans la Ville (Figure 2-12).

Servant pour les festivités nocturnes, les ampoules incandescentes récemment découvertes ne pouvaient pas assurer une lumière suffisante pour éclairer les fontaines, il a donc eu recours aux mèches lumineuses des arcs électriques générés depuis des dynamos installées un niveau plus bas (Idem).

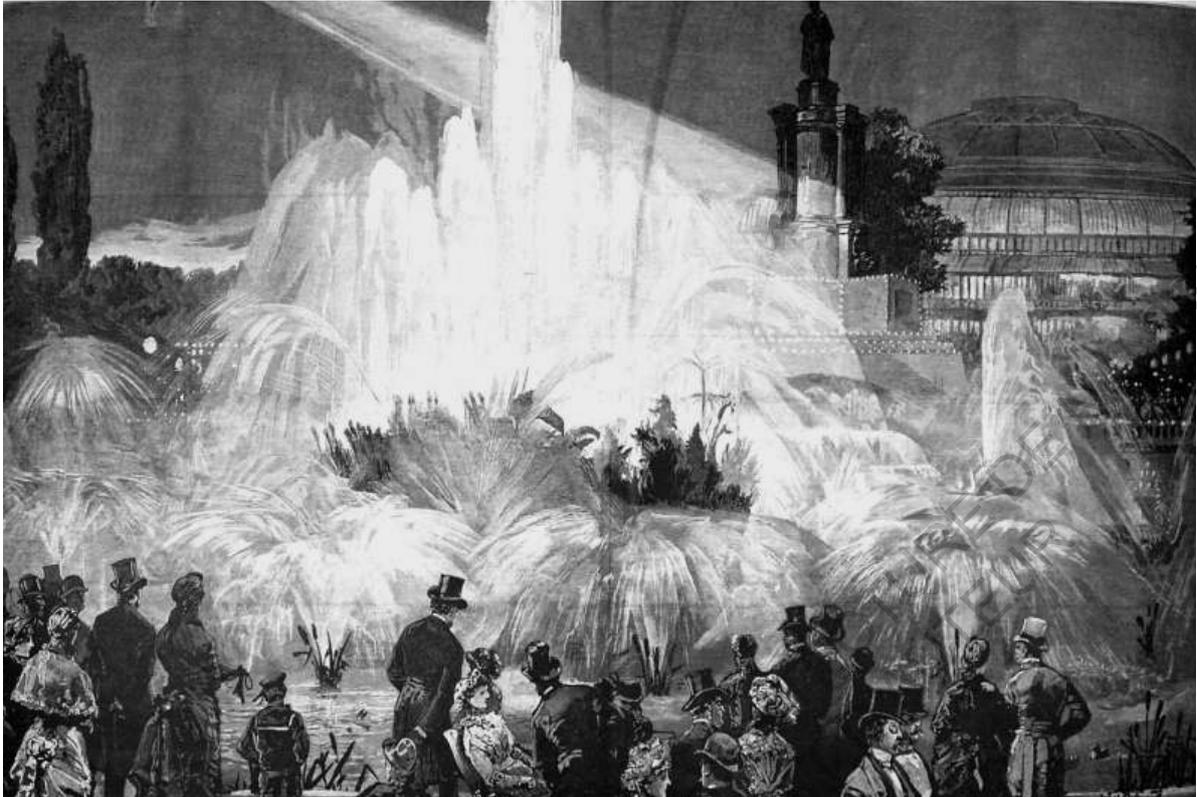


Figure 2-12 Peinture représentant les Fontaines lumineuses à l'Exposition Internationale de Santé de Londres 1884 (old-print.com)

2.2.12. En 1889 et en 1894, les expositions universelles de Paris et de Chicago :

Bien que le modèle de Wheeler n'ait pas vu le jour sous sa forme prévue, ceci n'a pas empêché que le principe d'éclairage par dynamo des fontaines lumineuses installées à l'occasion des expositions internationales de la fin du 19^{ème} siècle à Paris et à Chicago soit reproduit. En effet, la lumière de la lampe à arc installée sous le bassin de la fontaine, subit une réflexion spéculaire sur un miroir placé avant la sortie du jet d'eau, avant de subir une réflexion interne totale à l'intérieur du jet d'eau (Figure 2-15). Les plaques colorées donnent des nuances différentes de couleurs.

En 1907, G. Masiot, 'un constructeur d'instruments pour les sciences', reproduit le processus de canalisation de la lumière des fontaines lumineuses de Paris (Figure 2-13) dans son livre :

«..Nous allons vous faire assister à une reproduction de cette féerie,... Nous allons, si vous le voulez bien, remplacer l'agréable par l'utile et nous nous contenterons de vous montrer comment il est possible, non pas de mettre la lumière en bouteille, mais de la canaliser au sein d'une veine liquide. » (Masiot, 1907). Il rajoute : «Tous les reflets, tous les scintillements qui sommeillent, figés au sein des gemmes précieuses, paraissent s'amplifier dans les fines gouttelettes pour donner au regard ébloui et charmé l'impression magnifique d'un ruissellement de pierreries. Les gerbes liquides s'élancent, s'entrecroisent et se brisent, mates comme les jets d'argents, rouges comme des fusées sanglantes,

violettes comme des coulées d'améthyste jaune d'or comme la race persistence de topazes miraculeuses»



Figure 2-13 Peinture. Fontaines lumineuses de l'Exposition universelle de Paris 1889 (Musée Carnavalet, Paris)

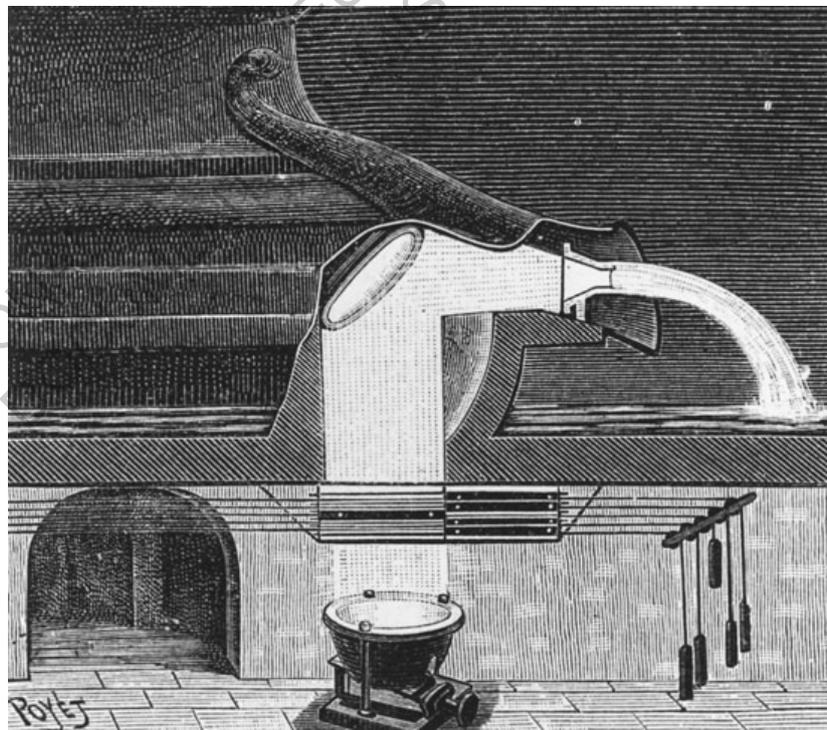


Figure 2-14 Dessin. Coupe sur une fontaine lumineuse de l'exposition de Paris 1889 (Hecht, 1984)

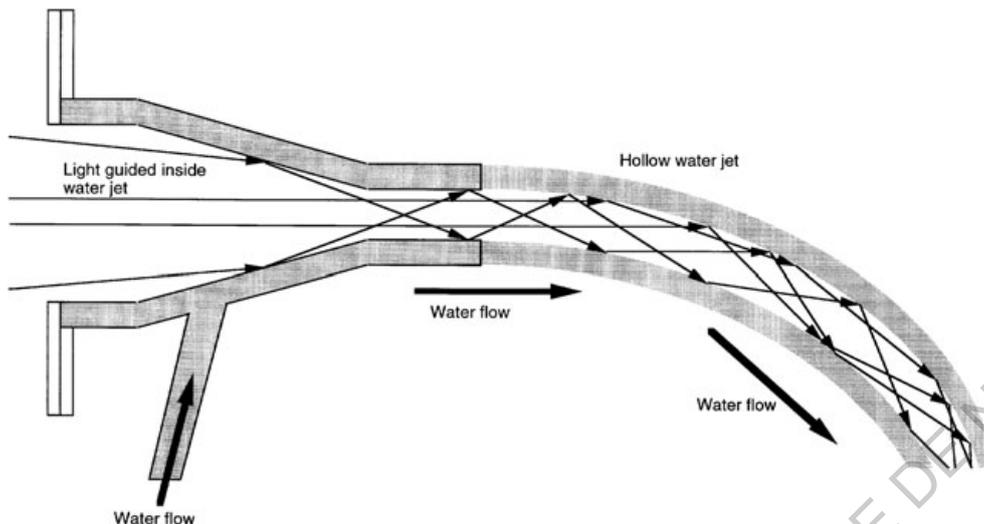


Figure 2-15 Schéma. Réflexion interne totale dans un jet d'eau. (Hecht, 1984)

Description du schéma: a : miroir réflecteur, b : axe de pivot de rotation du miroir, c : fourche, d : axe de déplacement de la fourche, e : support d'appui, f : collecteur intérieur (miroir), g : cône en verre à l'intérieur du collecteur f pour optimiser la transmission de lumière, h : Conduit de lumière verticale (miroir), i1 : diffuseur sphérique en verre translucide blanc (Milk Glass), j : conduit verticale en verre. K1, K2 : cordes pour régler manuellement l'orientation du miroir suivant la position du soleil, dans le but de maintenir une réflexion perpendiculaire au tube f. La corde (k1) est reliée au miroir (a) auquel un surpoids (a1) est rajouté à l'extrémité inférieure, et dont l'axe (d) est équipé d'un ressort qui maintien une force de rotation négative.

2.1.11 En 1901, l'appareil de transport de la lumière du jour dans le sous-sol d'Odilon Baltzar Hannibal Hanneborg :

O.B.H Hanneborg (1861-1919), était un agriculteur et inventeur originaire de Christiania (actuellement Oslo) en Norvège²⁷. En 1890, il proposa pour la première fois de collecter la lumière du soleil et la transporter vers les espaces profonds qui ne disposent pas d'assez de lumière du soleil, en utilisant un système composé d'Héliostat manuel, d'un tube creux pour la réflexion de la lumière et d'un diffuseur (Victoria Government Gazette, 1894), dont il dépose le brevet en 1900 et l'obtint en 1901. Dans son brevet il explique :

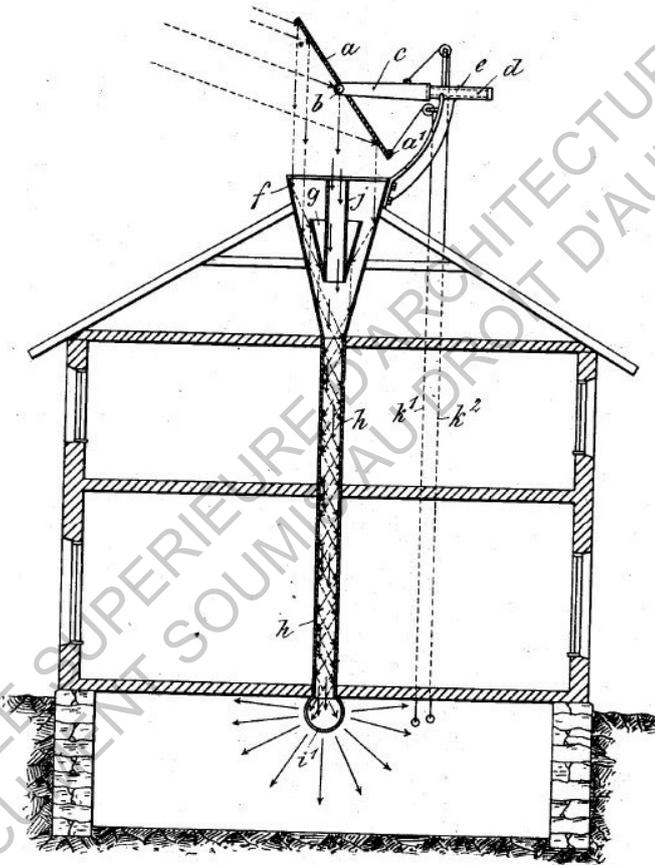
« Un miroir concentre la lumière qui provient d'une lampe à arc vers le centre parabolique des jets d'eaux. La buse génère un fil d'eau éclairé de l'intérieur par la lumière réfléchi ». « ...l'énergie cumulée, peut être utilisée sous forme de lumière ou de chaleur, pour les mines, comme pour les forts, les navires ou les espaces dont la lumière ne parvient pas directement » (Hanneborg, 1901)

La (Figure 2-16) montre un schéma illustratif du dispositif, où un collecteur de lumière est placé sur le toit et connecté par un conduit de lumière traversant verticalement les niveaux du bâtiment, à un diffuseur placé dans le sous-sol, pour éclairer l'espace, dans un système sophistiqué (Idem) permettant de contrôler l'axe d'incidence du rayonnement solaire.

²⁷ trees.ancestry.com.au

Hanneborg propose que le dispositif soit équipé d'un mécanisme semblable à celui d'une montre de façon à être efficacement exploité pour transporter la lumière du soleil (Idem). Cette méthode de captage du rayonnement est à son tour restée comme celle de Wheeler à l'écart des préoccupations de cette époque. Cela est due principalement à l'effervescence des découvertes liées à l'électricité et des lampes à décharge gazeuse aux supposées vertus thérapeutiques.

No. 668,404. Patented Feb. 19, 1901.
O. B. H. HANNEBORG.
APPARATUS FOR TRANSMITTING SUNLIGHT TO BASEMENTS OR OTHER STORIES.
 (Application filed Feb. 26, 1900.)
 (No Model.)



Witnesses:
 Ella L. Gile
 O. B. Hanneborg

Inventor:
 O. B. H. Hanneborg.
 per Richard R.
 Attorneys

Figure 2-16 Schéma. Appareil de transport de lumière solaire dans le bâtiment par Hanneborg (Hanneborg, 1901)

2.2 Lumiduc, entre utopies, science-fiction et littérature scientifique

2.2.1 En 1932, le projet utopique du *Depthscrapper*

Suite au tremblement de terre de 1923 de Tokyo, des ingénieurs japonais ont émis l'hypothèse que les tunnels et les espaces en sous-sols représentent moins de vulnérabilité aux mouvements sismique (Everyday Science and Mechanics Magazine, 1931). La solution ne se fait pas attendre. En effet, dans le numéro de Novembre 1931 de l'*Everyday Science and Mechanics Magazine* (ESMM, 1931), le dessin d'un bâtiment cylindrique de 35 niveaux enterré sous terre est alors publié dans un article sous le titre : *Depthscrapers Defy Earthquake* (Idem). la Figure 2-17 montre une illustration de cette utopie. C'était la réponse à ce contexte urbain particulier où il fallait réagir au plus vite et laisser une marge importante à la sécurité de la construction pour éviter de telles catastrophes en plus de la rareté de sols stables capables de supporter de telles constructions (Idem).

Avec un seul niveau laissé au-dessus du sol, des ouvertures étaient installées pour pomper l'air vers l'intérieur des appartements. Pour l'éclairage, il proposait un gigantesque miroir de 75 pieds (23m) de diamètre qui réfléchirait la lumière du soleil dans les espaces profonds (Idem), en sous-entendant dans l'article, que les futurs habitants du bâtiment ne seront pas enfermés ou déconnectés de la nature (Idem).

Pour parvenir à éclairer les espaces intérieurs du bâtiment, le dispositif consistait en un héliostat monté sur un mat au-dessus de la cour intérieur. Un socle en double appui, pivotant horizontalement autour de son axe relie le miroir à un axe qui lui permet de pivoter verticalement et transmettre les rayons solaires aux verres prismatiques installés sur les parois intérieures des appartements (Figure 2-18).

Le contexte particulier dans lequel est proposé le *Depthscrapper*, a permis d'aboutir en un modèle urbain qui investit la profondeur du sol. Nous pouvons supposer que la présence du miroir réflecteur dans la réflexion sur le projet, a facilité la production de cette forme. C'est alors tout un paysage urbain qui se trouve transformé.

2.2.2 En 1970, la ville utopique d'Ecopolis de Guy Rottier

Dans les années 1970, Guy Rottier, de même que Wheeler et Hanneborg, a souhaité transporter la lumière naturelle du soleil à l'intérieur des espaces habités. Celui-ci a réinvestit l'idée en se joignant à l'hélio physicien Maurice Touchais, inventeur d'un capteur solaire à la fin des années 1960. Par distinction aux câbles de fibre optique développés dans cette période, utilisés dans la médecine et plus tard dans les télécommunications et dont l'origine directe est la fontaine lumineuse de Colladon (Hecht, 1999, Colladon, 1841), Rottier fait référence à un lumiduc creux à réflexion spéculaire à section large. Il dessine alors la ville utopique souterraine en forme de colline : Ecopolis (Figures 2-19 et 2-20).

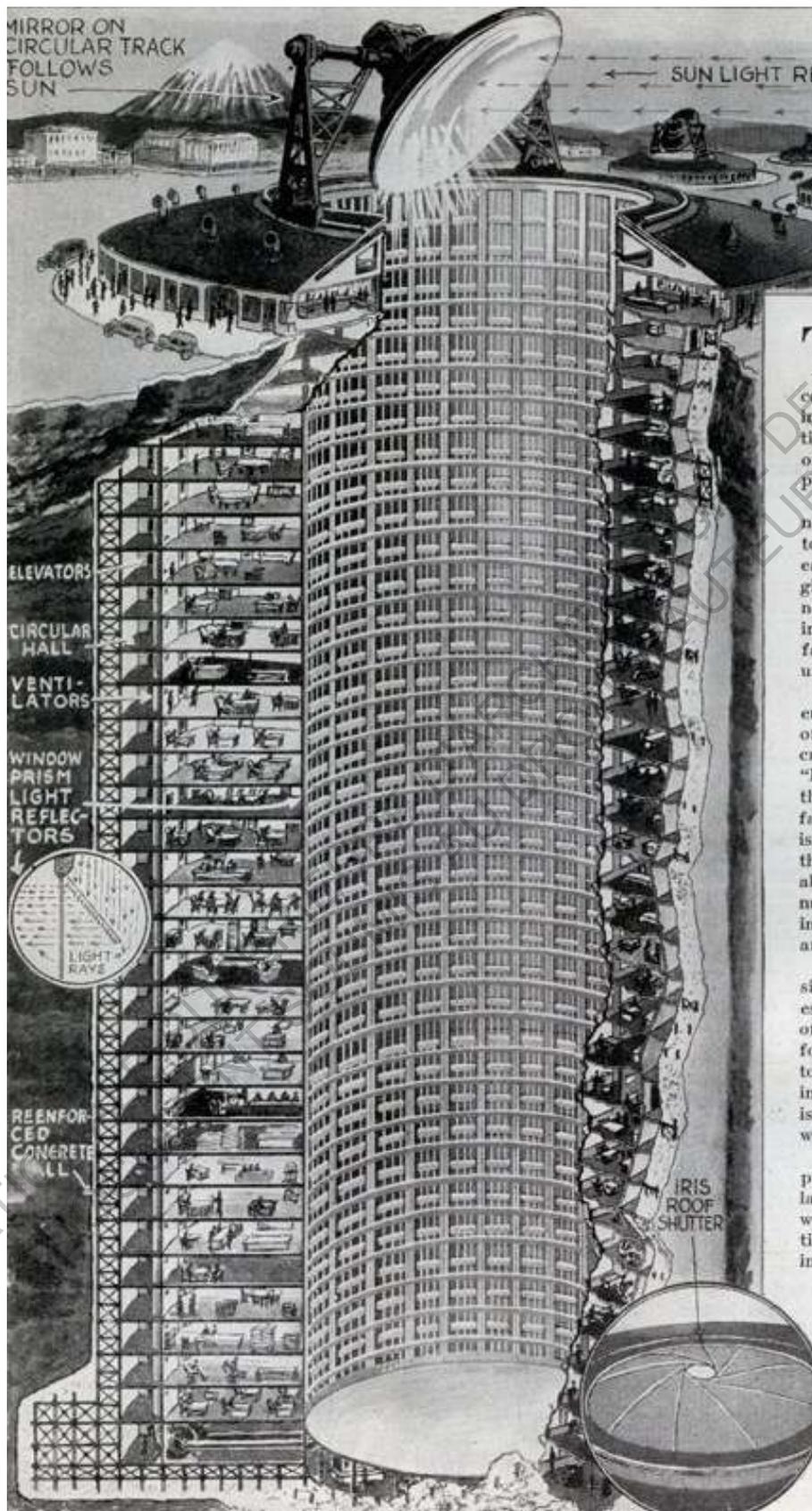


Figure 2-17 Dessin. Coupe axonométrique sur le Depthscaper (ESMM.1931)



Figure 2-18 Dessin montrant le Verre prismatique sur les parois du bâtiment. Depthscrapper (ESMM, 1931)

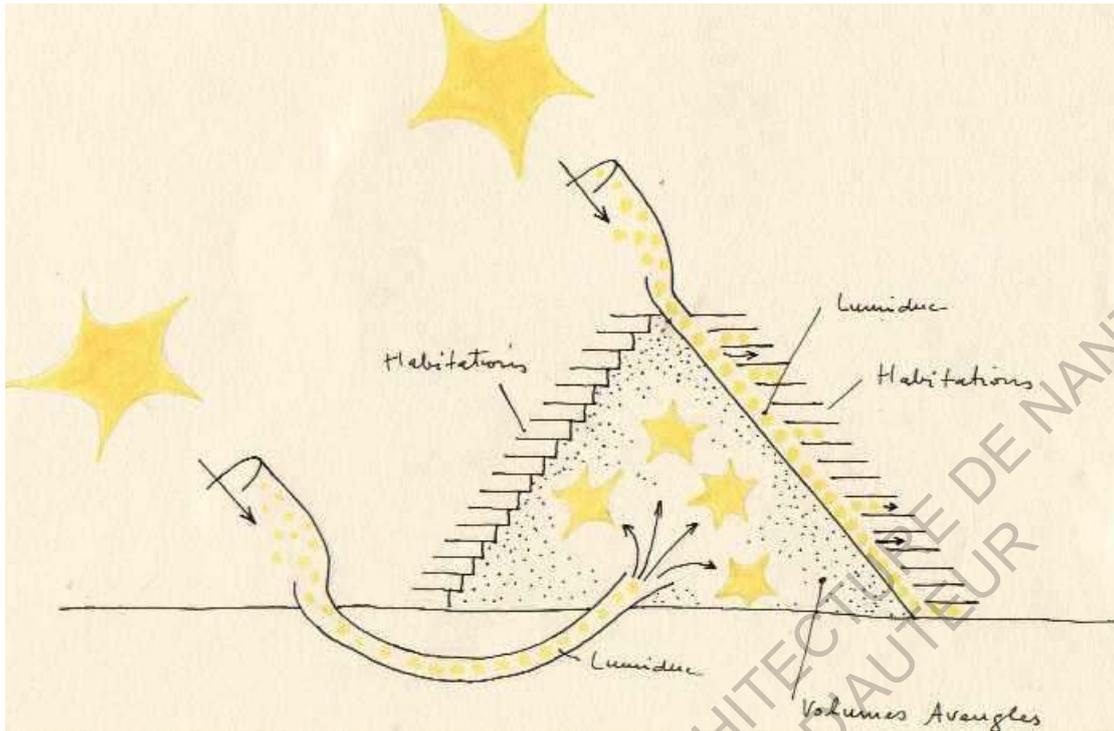
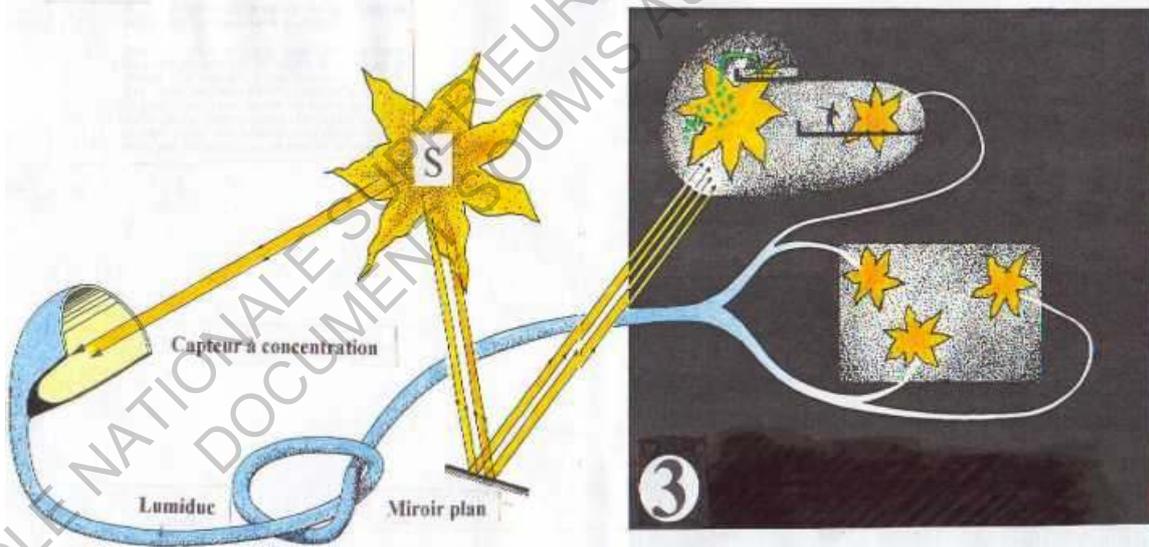


Figure 2-19 Dessin. Ecopolis, Guy Rottier. (tectonicablog.com/?p=14724)

2

La lumière solaire est une matière transportable, donc consommable à distance



Les notions traditionnelles d'orientation sont périmées

Figure 2-20 Dessin. Principe de transport de la lumière avec un lumiduc. Guy Rottier (tectonicablog.com/?p=14724)

Le point de diffusion séparé de celui de captage, il va ouvrir la porte à des réalisations et des formes urbaines qui ne peuvent être éclairées naturellement qu'à travers un lumiduc, annonçant une rupture avec les formes traditionnelles :

« L'architecture de papa (j'oriente le séjour au sud, la cuisine au Nord, la chambre au sud est...etc.) est morte. La nouvelle maison solaire pourra avoir les ouvertures à l'intérieur et le soleil, au lieu d'entrer dans la maison pourra en sortir s'il le veut, pour éclairer la pelouse située au Nord » (Rottier, 1972)

L'orientation tient compte de la vue plutôt que du soleil. la source de lumière devenant flexible, la forme devient plus libre (Rottier, 1972).

S'appuyant sur la théorie d'Edouard Utudjian il propose l'agencement des espaces encombrants ou ne nécessitant pas de lumière naturelle (cinéma, entrepôt) au cœur des villes. Les extrémités de ces villes soutiendraient des unités d'habitats semi enterrées. Ainsi, il donne à voir une stratification des espaces urbains suivant la priorité pour l'ensoleillement.

2.2.3 Roman de science-fiction : la vallée du temps profond de Michel Jeury

Michel Jeury (1923-2015), est un écrivain français dont l'œuvre est marquée par les publications de romans de science-fiction des années 1970-1980²⁸. Dans le recueil de romans : '*la vallée du temps profond*' (Jeury, 2013), il décrit une ville souterraine du future en temps de guerre, une situation qui a poussé ses habitants à se réfugier sous terre pour se protéger des menaces nucléaires (Idem).

Dans certains passages de ce roman, Il décrit le personnage d' *Aslana*, une femme habitant l'étage moins trois (-3) du quartier de *Yambo*. Décrivant l'ambiance de son appartement il écrit :

« ...une petite chambre qui sentait la poussière chimique et le déodorant ». Accompagné par son ami Mark, un officier militaire elle «.. ferma la fenêtre en expliquant à Mark que la pièce était assez claire le jour grâce au lumiduc qui débouchait dans le puits. Mark hocha la tête », un signe qui sous-entend que les lumiducs sont une technique répandue dans cette ville.

M. Jeury décrivant le geste de *Mark* écrit :

« Sa base (militaire) était souterraine et bien plus profondément enterrée que l'appartement d'Aslana ».

Cette description montre la manière dont est organisée cette ville souterraine, par une hiérarchisation des usages dans une profondeur verticale sous-terrain, qui comprend aussi bien des zones militaires que des fonctions urbaines /civils près de la surface, rendu exploitable grâce aux lumiduc.

²⁸ www.blog.jeury.fr/pages/michel-jeury

Il est utile de noter que l'auteur n'a évoqué que l'ambiance lumineuse pour décrire une qualité de confort dans ces zones profondes. Plus loin, il décrit la réaction de l'officier militaire *Mark* :

« Oh, moins trois, avec les lumiducs, c'est presque la surface. Et puis, ici, on sera peut-être à l'abri si l'Orbe utilise la bombe à structure... »

Il nous semble que Michel Jeury fait une liaison systématique entre le confort dans le souterrain et la présence de lumière du lumiduc.

Par ailleurs, Il nous dit que la vie en sous-sol n'est qu'un choix de dernier recours, lorsqu'il décrit le sentiment de *Mark* à l'égard de la vie dans cet espace :

« tu sais, j'aimerais mieux vivre à la surface si j'en avais les moyens »

Il semble dire que c'est une solution de fortune pour répondre sans doute à des préoccupations urbaines d'habitat et de sécurité militaire, si bien qu'habiter la surface devient un luxe.

Plus généralement, Jeury décrit une structure urbaine souterraine qui possède les paramètres d'une ville « *de surface* ». Il décrit des formes connues ; une place de village, où un figuier jette de l'ombre grâce au lumiduc qui transporte la lumière du soleil (Idem). Il décrit également des usages et des types d'espaces conventionnels (place du village, appartement, chambre), et s'efforce de démontrer la capacité du lumiduc à offrir une ambiance semblable de la surface. Dans un autre passage, il décrit une habitante d'une autre cité souterraine « *Yomba* » :

« Elle se leva, traversa la pièce et alla s'étendre près de la fenêtre qui s'ouvrait au ras du plancher et donnait sur une petite place ronde inondée de soleil par un lumiduc situé à l'étage au-dessus. Cette place du village servait de salle de séjour commune à cinq ou six appartements du niveau inférieur. » (Idem).

La profondeur de la forme urbaine est exprimée dans le caractère labyrinthique du réseau de déplacement souterrain de cette ville. Décrivant deux habitants de cette cité, il écrit :

« Silla conduisit Poango à sa chambre, qui n'était qu'à trois mètres de là, mais il fallait pour y accéder se faufiler dans un labyrinthe secret... ».

Au-delà d'une structure urbaine, il décrit une structure administrative et militaire bien établie. Il parle même de république (*la République de Milliabad*) : une ville verticale enterrée, réalisée pour se protéger des menaces militaires, rendue possible par le lumiduc dont la lumière naturelle est le principal critère de confort. Décrivant un autre habitant, M. Jeury écrit :

« 'Gam Simla' se recueillit de nouveau pendant quelques secondes. Une lumière vive et fraîche coulait à profusion du Lumiduc. La musique aigrette jouée aux étages supérieurs semblait tomber du ciel vide »

Ainsi, l'image du lumiduc est attachée à une qualité de confort lumineux permettant d'avoir un ensemble de formes urbaines structurées en sous-sol.

2.2.4 TPF : Entre science-fiction et prospective, à propos du logement collectif de F.Tribel

Ce travail de fin d'étude, propose une démarche prospective prenant en considération les limites du possible en terme de technologies, et s'inspirant des écrits des sciences-fictions pour imaginer la forme de l'habitat du future. Ce qui a attiré notre attention dans ce travail sur le logement collectif, est la vision faite du lumiduc au milieu des années 1980, cette période qui a connu le plus grand saut de la technologie de canalisation de la lumière naturelle (Cf. 2.3).

F. Tribel était parti du principe que le logement devenait de plus en plus un espace de travail et de loisir, et que la densité construite mène aux conflits sociaux. Il a abouti à la nécessité d'augmenter les surfaces de logements (Tribel, 1985) :

« Une autre raison d'augmenter la taille des logements est la mauvaise adaptation d'habitats de petites dimensions à la vie en société : densité, donc promiscuité, donc tensions qui seront libérées dans l'appartement, mais aussi à l'extérieur, posant le cout du problème social et la non-adaptation de l'habitat »

En prenant l'exemple d'une petite parcelle urbaine, il étale les possibilités de la forme urbaine : densifier en hauteur avec des bâtiments linéaires tout en ayant des hauteurs sous plafond assez importante donc plus de surface possible, ou densifier à la fois en hauteur et en épaisseur ce qui permettra une plus grande économie thermique (Idem). Ici, le problème principal qu'il soulève est celui de l'accessibilité de la lumière naturelle au centre de ces formes :

« Ou trouver la lumière naturelle pour le centre ? que faire des zones obscures ? Pour quelle activité ? Et comment faire fonctionner un appartement dont la forme sera linéaire si le bâtiment n'autorise pas l'usage de beaucoup de largeur en posant des problèmes de dessertes et d'indépendance des pièces ? »
(Idem)

A propos des espaces centraux (profonds) apparents dans le deuxième type de formes, il établit une juxtaposition de la vue et de la lumière naturelle en déclarant qu'une séparation pourrait être envisagée :

« la vue n'est en aucun cas susceptible d'amener la lumière naturelle »

Cette réflexion nous renvoie directement vers notre problématique. Pour résoudre le problème des espaces emprisonnés dans les noyaux des formes urbaines denses, il parle de quatrième dimension, en évoquant la notion de *décor* qui permet à la fois d'avoir une vue sur le paysage extérieur, des mouvements de la scène (ex. feuille d'arbre qui tombe), une perspective et une profondeur visuelle, se rapportant aux technologies télévisuelles (Idem).

Ainsi, dans sa démonstration, il cite des techniques beaucoup moins développées à son époque qu'elles le sont aujourd'hui, comme la projection sur un mur intérieur de films en boucle en haute résolution qu'il appelle : mur vidéo à haute résolution (Idem). Ces technologies 3D n'existaient pas encore. Il évoque l'usage de ce que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de réalité augmentée ou image interactive. Enfin, pour cette quatrième dimension, il suggère l'image holographique (Figure 33) qui consiste à transporter l'image des objets. Toutes ces propositions ont pour objet de minimiser l'absence de la vue dans le cœur des espaces profonds par un trompe l'œil, formant la substance de ce qu'il appelle : la fenêtre fictive (Idem).

La vue étant résolue par l'image, Tribel (1985) propose d'humaniser l'espace en transportant la lumière naturelle par lumiducs et donner une impression de temporalité (Idem). Il propose le principe de lumière naturelle graduée qui consisterait à répartir les prises de lumière à l'extérieur selon une orientation particulière :

«... comme si le jour avait une unité depuis la fenêtre jusqu'au mur le plus éloigné.. »(Idem)

Ainsi, il nous paraît que le confort lumineux des espaces profonds est une notion rattachée à l'évolution de procédés et techniques de transport de lumière naturelle et des images de synthèse à haute résolution.



Figure 2-21 Photographie. Expérimentations du principe Holographique²⁹

2.2.5 Article scientifique : Entre nostalgie et prospective, le temps présent de Colette Pétonnet

A la fin des années 1980, C. Pétonnet a publié un article où elle s'interroge sur la notion du *temps présent*, qu'elle définit comme étant un temps qui n'existe pas que :

« ... nous vivons au jour le jour, entre un passé révolu mais gardé en mémoire et un futur déjà projeté sinon réalisé... » (Pétonnet, 1989). S'interrogeant sur le devenir de l'habitat, elle cite l'exemple du lumiduc qui est encore à cette époque «...une réalité potentielle. » (Pétonnet, 1989).

Selon l'auteure, le lumiduc représente une forme d'aboutissement de la quête ancestrale de l'homme à dompter la nature,

« Le lumiduc ne représente qu'un pas de plus vers l'humanisation de l'espace et du temps... » (Idem)

, ouvrant la porte vers l'exploitation plus rationnelle d'une forme de ville souterraine en la faisant bénéficier du double confort : d'une température constante et d'un éclairage naturel.

L'article décrit le lumiduc comme étant l'ultime outil manquant à l'exploitation de la profondeur du sol. Ainsi, l'auteur rattache systématiquement le lumiduc à une nouvelle forme de la ville du futur :

« ... Le lumiduc annonce une nouvelle victoire : cette fois ce sont les points cardinaux qui n'imposeront plus leur loi, non plus que la rotation du soleil, puisque les capteurs sont capables de suivre celle-ci. La lumière est devenue une

²⁹ <http://www.maxigadget.com/tag/holographie>

matière maîtrisée, donc transportable. En conséquence, il devient possible de construire des villes souterraines bénéficiant du double confort d'une température constante sous un éclairage solaire » (Idem).

2.3 Précurseurs du Lumiduc

2.3.1 Kei Mori : transport de la lumière naturelle par fibre optique

En 1979, Dr. Kei Mori, professeur au Département des Sciences et de l'Ingénierie à l'Université de Kei au Japon, développe un système de collecte et de transmission de lumière naturelle qu'il appelle Himawari du nom de la fleur de tournesol (Himawari-net.co.jp).

Himawari est également le nom de la société qui c'est depuis développé. Selon Garcia-Hansen (2006), c'est probablement le premier modèle de transport de lumière opérationnel connu dont l'intérêt est d'éclairer les espaces intérieurs à distance (Garcia-Hansen, 2006).



Figure 2-22 Photographie d'un Capteur Himawari. (himawari-net.co.jp)

Son principe est celui de capturer à l'aide de lentilles Fresnel montées sur un capteur motorisé, la lumière du soleil et la canaliser dans des câbles de fibre en verre (The What's New Magazine, 1988).

Selon l'inventeur, l'intention porte prioritairement à exploiter les domaines tels que l'agriculture, l'aquaculture, ainsi que l'adaptation des espaces profonds aussi bien terrestres que sous-marins avec un taux de lumière naturelle suffisant. Le contexte japonais s'appuie

particulièrement sur ce type d'invention pour optimiser sa surface urbaine (The What's New Magazine, 1988).

2.3.2 Lorne Whitehead : transport de lumière naturelle par tube prismatique

En 1983, L. Whitehead lance la société TIR. Ltd dont le nom veut dire Total Internal Reflexion en référence au phénomène d'optique que le système utilise pour canaliser la lumière sur de longues distances (Idem). L'idée lui est venu quand il était étudiant en 1978 au département de Physique de l'université de la Colombie Britannique à Vancouver au Canada.. Travaillant dans les salles en sous-sol, il déclara dans une interview :



Figure 2-23 Photographie. Panneau prismatique. L. Whitehead (The What's New Magazine, May 1988)

« I often worked eighteen hours a day down there, under the glare and flicker of raw fluorescent lights... it occurred me that perhaps there would be a better way

to illuminate space if you could pipe light » (L. Whitehead in The What's New Magazine, May 1988)

Avant d'utiliser la lumière naturelle, le système était éclairé par une lampe électrique qui était orientée vers l'intérieur d'un tube prismatique, lui-même contenu dans une boîte qui permet à la lumière transmise d'être conservée et concentrée -théoriquement- sans pertes aucune (Idem). Le positionnement du luminaire était horizontal (Figure 2-24)

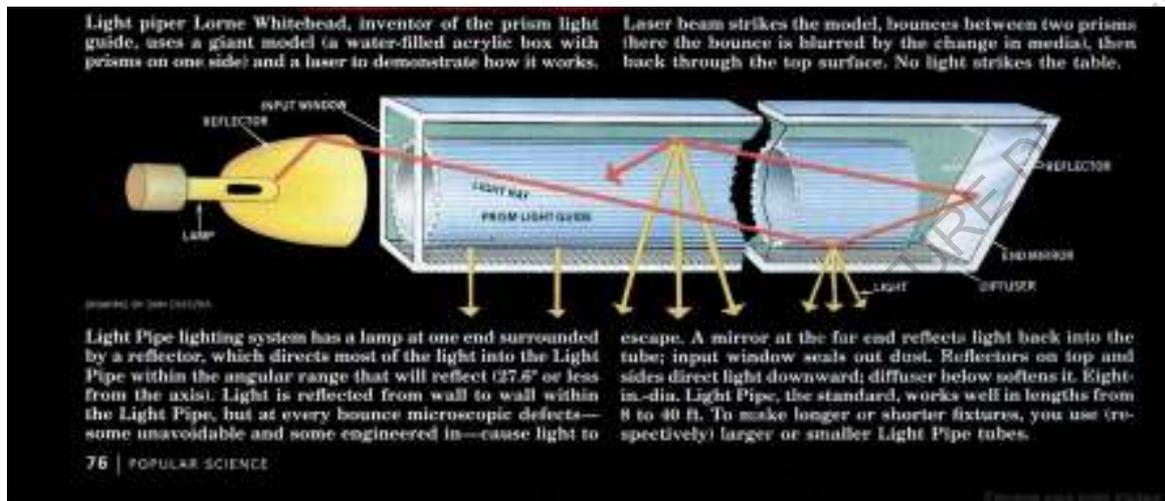


Figure 2-24 Schéma. Principe du Lumiduc à tube prismatique. Whitehead (The What's New Magazine, May 1988)

Grace à ce système, il est devenu possible d'avoir un tube illuminé sur plusieurs mètres de longueur (Idem).

Avant d'arriver à ce concept, Whitehead avait auparavant imaginé de collecter et de transporter la lumière grâce à des surfaces réfléchissantes (Idem). Constatant que les surfaces étaient absorbantes (5% selon lui), et qu'une vingtaine de réflexions au minimum étaient nécessaires, il décida d'abandonner ce projet (Idem). La fibre optique étant extrêmement chère, il a également renoncé à ce matériau.

2.3.3 Steven Sutton : transport de lumière naturelle par conduits à parois métalliques

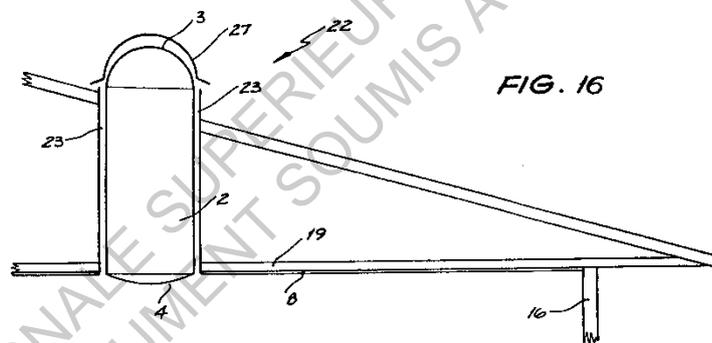
Dans la même période des années 1980, l'idée de canaliser la lumière naturelle en plaçant une prise sur le toit d'une maison, était à la base du développement du conduit de lumière à parois métalliques réfléchissantes. Celle-ci a été inventée en 1986 par Steven Sutton (Solatubescotlande.co.uk).

Ce type de lumiduc est le modèle le plus fidèle à la description faite par Guy Rottier du lumiduc. C'est devenue d'ailleurs le système le plus expérimenté et le mieux renseigné (Cf. Chapitre 3).

En voyant la (Figure 37), on peut dire que l'invention n'est pas nouvelle, mais son usage et son montage sur la forme existante des maisons résidentielles, permet d'avoir la même approche établie par Hanneborg en 1901, et par la suite Guy Rottier dans les années 1970.



Figure 2-25 Image. Lumiduc à parois métalliques. (Solatubescotland.co.uk)



U.S. Patent

Mar. 31, 1992

Sheet 8 of 13

5,109,622

Figure 2-26 Schéma de principe du conduit à parois métalliques (Sutton, 1986)

En 1992, ce lumiduc est commercialisé sous le nom de Solatube light pipe (Solatubescotlande.co.uk). Cette date marque un tournant dans l'usage des conduits de lumière dans les maisons d'habitation en devenant accessible par le grand public.

2.4 Synthèse

Après cette lecture chronologique sur la canalisation de la lumière naturelle dans l'histoire, il nous paraît que le contexte d'invention des outils réflecteurs dépend des besoins des différentes époques dont l'objet n'était pas toujours celui d'éclairer.

Depuis les tombes égyptiennes il y a 5000 ans, à la publication d'Ibn Alhaytham (Alhazan) du traité de l'optique au 11^{ème} siècle, marquant l'histoire de l'optique (Colin, 2001), le contrôle des faisceaux lumineux a mené à l'exploitation des surfaces réfléchissantes aussi bien dans le domaine militaire et horticole jusqu'au début du 19^{ème} siècle (Butti & perlin, 1980).

Les expérimentations scientifiques du 19^{ème} siècle où la lumière a été indispensable, a fait apparaître le besoin d'avoir une lumière permanente qui ne dépend pas de la course du soleil. L'invention de l'héliostat a traduit cette quête avec un premier modèle en 1827 ensuite avec Silbermann en 1843.

En parallèle, ces expérimentations ont fait découvrir le comportement de la lumière dans un liquide avec la fontaine lumineuse de Colladon. La lumière ne prenait pas forcément un chemin droit. Cette invention a été exploitée dans des événements majeurs tous au long du 19^{ème} siècle dont l'objet était principalement artistique. En utilisant le même principe de canalisation de la lumière naturelle, Graham Bell a utilisé le rayon lumineux comme alternative au transfert de l'information sonore. Il faut attendre cependant Wheeler et Hanneborg pour avoir une idée des systèmes dédiés à la canalisation de la lumière à l'intérieur des espaces habités. En plus d'une recherche d'efficacité lumineuse, l'autre préoccupation qu'expriment les deux inventeurs était économique.

Partant d'un besoin particulier à chaque époque et où l'éclairage était uniquement assuré par la lumière du soleil, le concept de lumiduc n'a cessé d'alimenter les imaginaires. Le 20^{ème} siècle a connu un galop important dans l'interprétation de ce dispositif dans la forme urbaine. Les architectes s'en sont inspiré pour le potentiel urbain qu'il représente, imaginant des formes entièrement révolutionnaires, comme par exemple l'apriori de résilience urbaine avec de le Depthscaper (enterrement de la forme contre les tremblements de terre et pour augmenter le nombre de logement dans un archipel pauvre en sols constructibles), d'écologie comme pour le projet utopique de Guy Rottier (encapsulèrent de la ville dans une seul forme solide pour préserver l'environnement). Nous constatons que l'accessibilité de la lumière naturelle représentait un obstacle majeur face à la concrétisation de tels types de formes, même si elles permettraient de remplir leurs rôles d'un point de vue fonctionnel, social, ou écologique. L'absence de la technologie n'a pas donc empêché son imagination. Enfin, le lumiduc a également alimenté l'imaginaire de la science-fiction en se plaçant -de par sa nature et son rôle- à l'interface entre l'une utopie et le réel.

Dans le chapitre qui va suivre, nous nous intéressons aux aspects techniques du lumiduc contemporain.

3 Chapitre 3. Technologie du lumiduc contemporain

3.1 Concept du lumiduc

3.1.1 Définition

Le principe de canalisation de la lumière naturelle a été approfondi dès la fin des années 1970 avec l'avènement de la fibre optique et l'adoption de celle-ci dans le domaine de l'éclairage intérieur (Hecht, 1999). En effet, la technologie du lumiduc est considérée aujourd'hui comme mature (Carter, 2014).

A travers une lecture approfondie dans la littérature spécialisée, nous pouvons estimer que les lumiducs (terme générique) sont tous les dispositifs linéaires qui canalisent la lumière pour éclairer les espaces profonds, dépassant par leurs portées les dispositifs traditionnels et d'optimisation (Cf. Chapitre1). Ils comprennent obligatoirement trois composantes : un tube canalisateur, un capteur placé à l'extérieur et un diffuseur à l'extrémité intérieure (Carter, 2014, Carter et al. 2006).

Dans le dictionnaire en ligne Reverso on peut lire que la définition du lumiduc est :

« nm; appareillage à base de miroirs permettant d'envoyer la lumière du jour jusqu'à une habitation souterraine »³⁰

Cette définition de lumiduc est liée au domaine de l'architecture. D'ailleurs, si on s'en tient à l'architecte Guy Rottier et l'hélio-physicien Maurice Touchais, on peut constater qu'ils se sont largement appuyés sur le terme pour définir à la fois un objet :

« Tubes à parois intérieures réfléchissantes qui, reliés à un miroir capteur, permettent d'éclairer des volumes aveugles et profonds et incidemment, de réduire la pollution » (Rottier, 1970),

, mais également un principe conceptuel urbain à travers le pari qu'il représente dans l'imaginaire de la ville utopique d'Ecopolis (Cf. 2.2.2).

D'après la littérature que nous avons pu consulter, nous constatons que le terme de lumiduc n'est pas très répandu. En effet, les publications scientifiques sur la technologie de canalisation de la lumière dont il fait partie, sont dans leur totalité des laboratoires anglo-saxons, australiens, américain et principalement anglais. Les termes suivants sont utilisés pour désigner le même sens que le lumiduc :

Le Daylight Guiding System (DGS) désigne les dispositifs qui servent à augmenter l'apport en lumière du jour à l'intérieur des espaces profonds, et n'ayant pas d'ouverture directe sur l'extérieur (Mayhoub, 2014).

³⁰ dictionnaire.reverso.net/francais-definition/lumiduc

Les Tubular Daylight Guidance Systems ou TDGS, traduit par systèmes tubulaires de conduction de la lumière du jour, sont une sous-catégorie des DGS (Carter et al, 2006).

Carter (2014) définit les lumiducs comme des dispositifs linéaires qui canalisent la lumière du jour, comprenant trois parties : une composante qui permet de transporter la lumière (tube canalisateur), les capteurs extérieurs et le(s) diffuseur(s) qui transmettent le flux de lumière à l'intérieur (Carter et al, 2014, 2006, 2002).

Dans la même définition, on peut retrouver les termes de **light transport system** (système de transport de lumière) (Garcia-Hansen, 2003), de **light wells** (puit de lumière), de **light pipes** (tube de lumière), de **Hollow Light Guide** (tube de lumière creux) ou de **Solar Light Pipe** (tube de lumière solaire) (Zhang et al, 2001).

Parmi ces dispositifs, le **light pipe**, ou **mirrored light pipe** (le tube de lumière et tube de lumière à miroirs) (Nilsson et al, 2014, Nair et al, 2013,) est le plus simple et le plus proche du principe de base du lumiduc d'Hanneborg et de l'architecte Guy Rottier, il est aussi le plus étudié jusqu'à ce jour (Baroncini et al, 2010).

A côté du terme englobant de **Daylight Guiding Systems** (DGS) (Carter et al, 2014, Mayhoub, 2014), R. Barrett (2003), architecte et chercheur à l'université de Queensland en Nouvelle Zélande, spécialisé dans la question des espaces profonds, emploie le terme de **Core-Daylighting Systems** pour désigner tous les dispositifs d'éclairage des espaces profonds dans le bâtiment (Barrett, 2003).

les **Light guiding systems** selon (Nair et al, 2013) désignent l'ensemble des systèmes dont le mécanisme repose sur les phénomènes physiques de propagation de la lumière, c'est-à-dire la réflexion et la réfraction du rayonnement lumineux. Cette définition comprend entre autre la fibre optique et les dispositifs anidoliques (Cf. 1.5.5.) (Idem).

Arrivé à ce stade, il nous paraît nécessaire de faire la différence entre le concept d'un lumiduc. D'une part, il définit un dispositif d'optimisation de l'éclairage naturel pareil que le reste des dispositifs d'optimisation vus au chapitre 1. D'une autre part, sa vocation principale est le transport à des distances éloignées de la lumière naturelle, avec des fonctions de captage, de transmission et de diffusion de lumière naturelle assurées par des composantes dimensionnées et articulées dépendant étroitement l'une de l'autre.

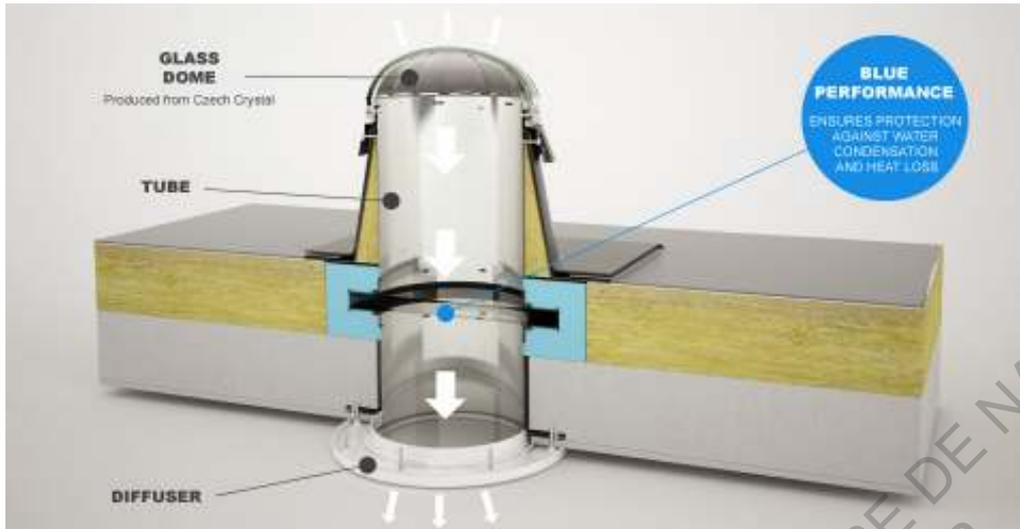


Figure 3-1 Lumiduc à tube creux. Lightway (lightway.uk)



Figure 3-2 Photographie. Capteur d'un Lumiduc à tube solide (fibre optique). (Parans.com)

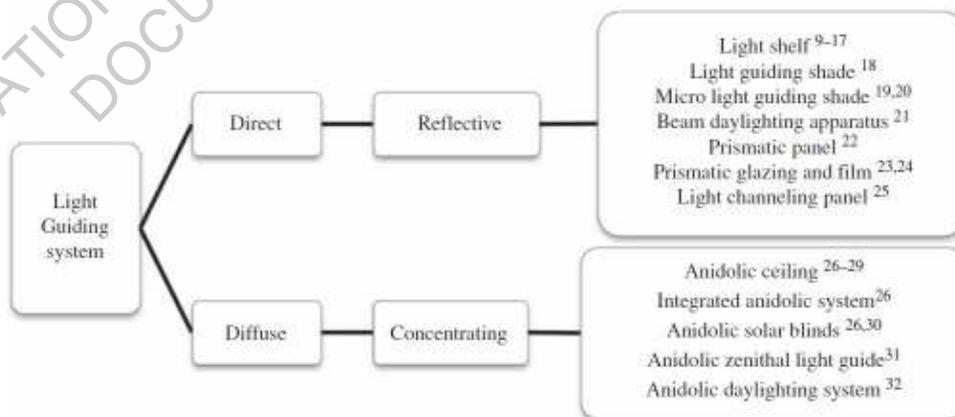


Figure 3-3. Schéma. Classement des *Light Guiding Systems* selon Nair et al. (Nair et al, 2013)

3.1.2 Eléments composants le lumiduc

a. Le capteur :

Pour un lumiduc, la fonction de collecte est la plus délicate (Baroncini et al, 2010). La lumière naturelle est collectée depuis la source directe du soleil et de la voute céleste (Zhang et al, 2001). La performance du capteur et le type de ciel permettent de déterminer le taux de lumière naturelle disponible à transportée (Baroncini et al, 2010). De manière générale, les capteurs sont installés à l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment, sur le toit ou sur la façade (Kwok, 2011).

La caractéristique principale qui est commune à tous les capteurs est celle de transmettre un spectre de lumière visible sans rayons IR et moins de Rayons UV (Curt Maxey et al, 2008).

Il existe plusieurs types de capteurs qui dépendent de plusieurs paramètres dont : la forme géométrique, les matériaux, la technique de captage, la taille du tube, le nombre de composantes.

Un capteur peut prendre plusieurs formes géométriques. La forme en dôme est la plus répandue, il peut également s'agir d'une forme plate, de lentilles ou d'une surface anidolique (surface réfléchissante concave ou convexe).

Les capteurs sont faits de matériaux transparents : verre, acrylique ou polycarbonate, ou de miroirs en verre, ou de surfaces métalliques polies. Le premier permet au flux de lumière d'être transmis directement vers le tube canalisateur. Le second peut être une parabole concentratrice ou un miroir directeur, dépendamment du type de tube.

Leur taille dépend du taux de lumière nécessaire à l'intérieur. Ils consistent en des réflecteurs composés de miroirs plats, des miroirs paraboliques ou des collimateurs (lentilles) (Garcia-Hansen, 2006).

Les capteurs sont nommés en référence à la source de lumière qu'ils collectent. Par conséquent, nous distinguons deux types : les capteurs passifs et les capteurs actifs. (Nair et al, 2013) (Annexe 3).

. Capteurs Actifs :

Ce sont des héliostats, ils assurent un maximum de captage de lumière directe grâce à leur flexibilité à capturer les rayons du soleil à partir de 15° de hauteur (Garcia-Hansen, 2006, Zhang et al, 2001, Oakley et al, 2000). Les capteurs les plus efficaces, en raison de la configuration automatique de leurs systèmes de rotation (Baroncini et al, 2010). Ils ont néanmoins besoin de maintenance importante des moteurs (Idem).

Ces capteurs possèdent un tableau électronique embarqué qui calcule la position du soleil à partir de données obtenues depuis des observatoires astronomiques (Curt Maxey et al, 2008). Ce tableau permet au capteur de changer en fonction de l'azimut et de l'angle

d'inclinaison du soleil (Idem). A la fin de la journée le moteur oriente le dispositif dans une position initiale, pour attendre le lever du soleil du jour suivant (Idem).

. Capteurs passifs :

Ce sont des capteurs statiques dont la forme et la disposition en toiture sont configurés de manière à collecter le maximum de lumière directe et diffuse en journée. Ils sont souvent larges afin de compenser le manque de l'héliostat (Garcia-Hansen, 2006). Leur forme est généralement en dôme (Idem) (Figure 3 :1)

b. Le tube :

Relié au capteur solaire, c'est la partie dont le rôle est de canaliser la lumière naturelle collectée vers les espaces profonds au-delà de la zone passive (Baker et al, 2000, Garcia-Hansen, 2006).

De section circulaire ou carré, le tube est caractérisé par le matériau qui le compose. Il peut atteindre plus 95% de taux de réflectivité lorsqu'il s'agit de parois métalliques (Rosemann et al, 2008). Il peut être fait en verre prismatique, de matériaux composites transparents comme l'acrylique et le polycarbonate dont les caractéristiques sont proches de celles du verre clair, ou bien de câbles de fibres optiques. Enfin, il peut être composé d'une succession de lentilles Fresnel directionnelles permettant d'avoir une lumière collimatée (Nair et al, 2013).

Les tubes faits de matériaux métalliques sont opaques et faits soit d'aluminium, d'aluminium argenté poli ou de plastique argenté hautement réfléchissant (Nair et al, 2013). La compagnie Solatube (saltube.uk) a développé un film atteignant 99.7% de taux de réflectivité pour ses modèles les plus performants. Le matériau qui compose le tube de fibres optiques et fait à base de verre, de plastique ou de silice. Les lentilles servant de relais à la lumière transportée peut également être faite à partir de ces matériaux.

Le tube transporteur est soit rigide ou souple, ce qui influe directement sur la quantité de lumière transmise entre les deux extrémités du tube.

La longueur d'un tube canalisateur peut aller de 1.5m jusqu'à 200m avec la fibre optique et les tunnels de lumière. Cette capacité de 200m est communiquée par la société japonaise Himawari. Cependant, on ne sait pas exactement si cela est efficace ou pas, car nous savons déjà que la fibre optique est utilisée dans des distances beaucoup plus importantes notamment dans le domaine des télécommunications (Hecht, 1999), puisqu'une différence subsiste entre les deux types de fibres utilisées (voir Annexe).

c. Le diffuseur :

C'est la partie qui permet à la lumière transportée d'être délivrée à l'intérieur de l'espace en question. Le type de lumière diffusée peut être exclusivement naturel, et peut aussi être

hybride en rajoutant des sources de lumière artificielle. L'objectif étant aussi de réguler le taux de luminosité disponible (Curt Maxey et al, 2008).

Les diffuseurs prennent des formes concaves, convexes, ou plates, de même que pour les luminaires utilisés pour l'éclairage artificiel (Paroncini, 2007).

Par ailleurs, le tube peut être fait de telle sorte à transmettre une lumière sur sa longueur. Le nombre de diffuseur montés sur le tube varie selon le besoin de chaque espace, on parle alors d'extraction de lumière (Garcia-Hansen, 2006).

Le matériau constituant le diffuseur est principalement l'acrylique ou les polycarbonates plus ou moins opaques. Le coefficient de transmission du matériau varie selon le type de lumière recherchée.

Enfin, la diffusion peut être ponctuelle, une succession d'extracteurs (diffuseurs) ou linéaire à travers le tube-diffuseur transparent lui-même.

3.1.3 Procédés de transport de la lumière

Comme évoqué, le type de matériau du tube décide du type de phénomène optique utilisé dans le transport de la lumière et de son efficacité lumineuse et globalement du nom du lumiduc. (Nair et al, 2013).

Dans les lumiducs que nous retrouvons dans le commerce, les phénomènes optiques utilisés permettent à la lumière collectée d'être : réfléchi, réfracté, collimaté ou absorbé (M.C. Lam, 1986, Lechner, 2015).

a. La réflexion simple : principal phénomène optique utilisé dans le transport de lumière des lumiducs (Boubekri, 2008, Lechner, 2015). Elle peut être spéculaire ou diffuse. Le facteur de réflectivité étant le rapport entre la quantité de lumière réfléchi à celle incidente, compris entre 0 et 1 (Lechner, 2015), peut atteindre –théoriquement- sa valeur maximale dans le cas de la fibre optique (Walker et al, 1996).

Trois aspects essentiels caractérisent la lumière réfléchi : sa quantité, qui est déterminée par le facteur de réflectivité, son type, spéculaire ou diffus, et sa sélection spectrale, c'est-à-dire la couleur de la lumière (M.C. Lam, 1986). Les surfaces parfaitement polies ou bien les miroirs, produisent des réflexions spéculaires où l'angle d'incidence est équivalent à l'angle réfléchi (Idem), d'où l'importance accordée à l'angle d'incidence au niveau à la fois du capteur que du tube.

b. La réfraction : c'est le changement d'angle d'un rayon de lumière incident qui traverse un autre milieu dont l'indice de réfraction est plus grand. La réflexion interne totale est l'un de ses effets secondaires (Idem).

c. La réflexion Interne Totale: c'est un effet secondaire de la réfraction, elle concerne la partie de la lumière qui est réfracté / transmise au deuxième milieu transparent (Hecht,

1999). Dans les fils de fibre optique, la lumière entrant subit ce phénomène de la même manière que dans l'eau (Walker et al, 1996). Nous pouvons le retrouver dans la fibre optique dont la section du tube est particulièrement petite comparée à sa longueur (Idem). (Cf. Figure 27)

d. la lumière collimatée : c'est une lumière, qui après réfraction sur une surface directionnelle (ex. lentille Fresnel, parabole), aura des rayons lumineux propagés de façon parallèle. L'alignement des lentilles dans certains tubes, permet d'avoir un flux de lumière droit ce qui permet de subir un minimum de réflexion sur les parois d'un tube canalisateur.

3.1.4 Types de Lumiducs

Ainsi, à partir des matériaux et du phénomène d'optique qui sert à transporter la lumière, nous distinguons trois types de lumiducs. Le premier reposant sur la réflexion simple est composé par des surfaces métalliques polies. Le second utilise le phénomène de réflexion interne totale qui circule dans des filets de fibre optique comme les filets d'eau des fontaines lumineuses de Colladon, et le dernier génère une lumière collimatée droite utilisant des lentilles alignées (Mayhoub, 2014, Nait et al, 2013,).

Pour faire la différence entre les trois, nous avons choisi de reprendre les termes utilisés dans le rapport de l'ANR sur l'éclairage des espaces souterrains (Derlande et al, 2015), qui désignent les systèmes de transport de lumière naturelle comme suit : en conduits de lumière, en fibres optiques et en tunnels de lumière (Idem). Nous considérons que les tubes à parois prismatiques sont compris dans la catégorie conduits de lumière, même s'ils utilisent le phénomène de réflexion interne totale, et ce en raison de la section importante de leur tube.

a. les conduits de lumière : dont le principe de transport repose sur la multi-réflexion spéculaire, possède une section de tube relativement grande comparée à la fibre optique (Baroncini et al, 2010). Nous distinguons dans cette catégorie les conduits à miroirs, et les conduits prismatiques. Le capteur et le tube ont généralement le même diamètre (Idem).

Les conduits de lumière transparent ou **Hollow Prismatic**, consistent en un tube transparent d'acrylique (plastique). Les facettes externes ont des formes de prismes. Les facettes internes se comportent comme des miroirs par un processus de réflexion totale interne. Le tube prismatique a deux effets principaux : la réflexion interne le long du tube et la transmission de la lumière dans l'espace (Garcia-Hansen, 2006).

Pour venir percuter les facettes prismatiques externes, l'angle d'incidence doit être au maximum de **27.6°** (demi-angle) par rapport à la verticale, et ainsi former un cône de **55.2°** (Whitehead, 1988). Quand le rayon lumineux incident est compris à l'intérieur de ce cône, la transmission du tube atteint les 98% (Idem). L'angle est critique principalement dans le cas des parois prismatiques, car celles-ci se comportent comme milieu réflecteur et réfracteur

(Idem). Il transmet par réflexion spéculaire et par réflexion interne totale. Sa performance est de 30% pour un ratio d'aspect (la longueur par rapport au diamètre) de 15 (Idem).

L'avantage des conduits de lumière à corps creux transparents est le transport et la diffusion en même temps, avec une répartition uniforme du niveau d'éclairage intérieur (Idem). Les caractéristiques du matériau permettent de retrouver des solutions aux espaces profonds. Ils ont néanmoins les inconvénients de l'intégration dans la forme architecturale traditionnelle (Garcia-Hansen, 2006).

b. Lumiducs à fibres optiques ou à tiges lumineuses : le principe de canalisation de la lumière ici, repose sur la réflexion interne totale (Walker et al, 1996). Généralement faits en acrylique (PMMC), ce sont des lumiducs dont les tubes sont à cœurs solides (Idem).

La fibre optique est composée de deux parties : une première qui consiste au cœur qui transporte la lumière et une couche externe qui empêche les pertes de lumière (Garcia-Hansen, 2006). Son efficacité est grande, celle-ci dépend de la longueur et non du diamètre du tube contrairement aux conduits de lumière (Idem). Son diamètre est compris entre 50-150 μ m. Plusieurs fils peuvent être regroupés pour faire un seul câble de 10mm (Curt Maxey et al, 2008). Les fils rigides ultra clairs, les fils de verres à multi-cœurs ou les fibres à polymères, sont plus chers. Moins chers sont les fibres en polymère souples ultra claires et à simple cœur (Idem).

c. Tunnels de lumière : consistent à transporter une lumière collimatée grâce à un alignement le long du tube-diffuseur de lentilles Fresnel convergentes (Garcia-Hansen et al, 2003). Leur principal inconvénient est cependant la difficulté de montage et de maintenance (Idem).

Tous ces types de lumiducs sont représentés par des sociétés. Les dispositifs passifs à tubes métalliques sont les moins performants (**Mirrored light pipe**) (Baroncini et al, 2010). Ce sont également les moins chers et les plus expérimentés (Idem).

3.1.5 Paramètres de dimensionnement

Le fonctionnement du système et les facteurs qui influencent sa performance sont résumés par (Zhang et al, 2001) comme étant :

Des facteurs de l'environnement extérieur : type de ciel (ensoleillé, nuageux ou couvert), l'irradiation solaire (densité énergétique solaire reçue sur une surface), la hauteur du soleil et la latitude.

Des facteurs liés à la géométrie du lumiduc : c'est-à-dire la longueur du tube (L), le diamètre du capteur et/ou du tube (D), le ratio d'aspect (L/D), le nombre de coudes dans le tube, l'angle de chaque coudes et la forme du diffuseur. Selon Zhang et al (2001), l'équipe de pour chaque 30° de coude, il y a une perte de 20% du flux transmis. Oakley et al (2000) concluent en comparant deux conduits de lumière l'un droit et l'autre avec coude que 14% d'efficacité

lumineuse est perdue, au même moment que le fabricant (Maunodraught) annonçait 8% seulement de pertes (Oakley et al, 2000).

Les matériaux : les types de matériaux composants le capteur, le tube et le diffuseur sont déterminants dans la qualité et la quantité de lumière transmise.

Plus particulièrement, les paramètres influençant l'efficacité de la fibre optique sont :

. **L'affaiblissement de la puissance du signal lumineux le long de la fibre**, dont l'unité est en dB/m. Par exemple avec une valeur d'atténuation de 0.1 dB.m⁻¹ à 0.6 dB. m⁻¹, il perdra la moitié de son intensité après une distance de 18 à 30m (Walker et al, 1996).

. **L'angle d'admission ou le cône ou l'ouverture numérique** de la lumière qui indique le maximum de lumière qui peut entrer dans la fibre. Les fibres les plus efficaces sont celles qui ont l'angle le plus petit (Idem). Au-delà de cet angle il n'y a pas de réflexion interne totale.

3.1.6 Fabricants

Suivant notre classement des types de lumiducs, nous distinguons les fabricants suivants (Annexe 8) :

Conduits de lumière : c'est-à-dire les *mirrored light pipes* et les *prismatic light pipes* nous retrouvons essentiellement les fabricants : Solatube, Monodraught, Lightway, VELUX, Héliobus, Sundolier.

Passifs ou actifs, la différence majeure des conduits de lumière avec les autres lumiducs est la grande dimension du tube; difficile à être intégré dans la forme architecturale (Garcia-Hansen, 2006). Aux systèmes à miroirs, nous pouvons rajouter les systèmes anidoliques (Figure 1-17 p.23) développés au début des années 2000, notamment avec les travaux de Courret et Scartezini de l'EPFL (réf. Thèse doctorale Courret, 1998).

Lumiduc à fibre optique : les plus célèbres sont le fabricant japonais Himawari, le suédois PARANS et plus récemment la Start up française ECHY.

Tunnel de Lumière : c'est le lumiduc le plus sophistiqué ce qui peut expliquer sa rareté sur le marché. Il existe à notre connaissance un seul fabriquant dans le monde qui est le Coréen Sunportal dont la technologie est utilisée dans le jardin souterrain du lowline à New York.

Le souci avec cette dernière technologie est qu'elle est particulièrement compliquée à mettre en œuvre, et qu'il n'y a pas de retour d'expérience significative sur l'efficacité des produits, notamment en raison de l'évolution constante de la technologie et sa limitation technique (Garcia-Hansen, 2006).

3.2 Efficacité lumineuse du lumiduc

3.2.1 Selon les fabricants de lumiducs

La principale caractéristique de ces lumiducs est la différence de performances par ciel clair et par ciel couvert. Tous les lumiducs fonctionnent mieux avec un flux solaire important (Paroncini et al, 2007, Zhang et al, 2001, Oakley et al, 2000).

Parmi les lumiducs proposés par les fabricants de conduits de lumières, Lightway, Monodraught et Solatube, la capacité maximale de transport ne dépasse pas les 10 mètres dans le cas d'un film en aluminium multicouches (cette distance est annoncée uniquement par Solatube). Une étude a été menée en 2001 par l'équipe de Muneer (2001) sur 18 cas de conduits de lumière de type Monodraught. Les résultats sont déterminés dans l'Annexe 7.

Le fabricant de lumiducs à fibre optique Himawari annonce 200m de capacité de transport de la lumière, tandis que PARANS annonce 20 m de longueur (Mayhoub, 2012). Cette différence est dû au type de matériaux utilisé (Cf. Annexe 8).

3.2.2 Le modèle mathématique de Zhang et al, 2001

Un indicateur d'évaluation d'éclairage du lumiduc a été proposé dès le début des années 2000 : le Deep Penetration Factor DPF (Zhang et al, 2001). Comme pour le Facteur de lumière du jour, c'est le rapport de l'éclairage intérieur sur l'éclairage extérieur, avec les paramètres de dimensionnement propre aux conduits de lumière.

$$\text{DPF} = \text{DPF int} / \text{DPF ext}$$

L'Annexe 6 montre les modèles mathématiques permettant de calculer le taux de lumière naturelle transmises par un conduit de lumière à parois métallique, où deux types de lumiducs sont distingués : les lumiducs droits (sans coudes) et les lumiducs avec des coudes (Idem). Les résultats des mesures sont résumés dans l'Annexe 7.

3.2.3 Expérimentalement par Paroncini et al, 2007

Pour démontrer l'efficacité du système, Paroncini et son équipe (2007) ont réalisé des mesures de janvier 2005 à juin 2006 en faisant installer dans une chambre expérimentale un lumiduc de diamètre **D = 0.25m** et **L = 1m**, dont le ratio d'aspect **D/L = 4**. Le capteur est fait d'acrylique (permet 10% de transmission en moins que le verre mais il est plus résistant), le tube revêtu par un film en aluminium multicouches à 99% de réflectivité et le diffuseur en acrylique en forme de dôme. **A 2.2m** du diffuseur, les résultats des mesures ont démontré une variation de la moyenne de transmission de **78 lux à 7h** à **428 lux à 11h** (une moyenne de **250lux/ jour**)(Idem). La moyenne maximale du **DPF = l'hiver 0.4%** et **l'été 0.6%**.

En Février la valeur maximale est de **107 lux**, avec **43.8 Lux** de moyenne et un **DPF** de **0.38%** (Idem). En juin la valeur maximale enregistrée est de **617 lux**, avec **152 lux** en moyenne. Un **DPF moyen** de **0.36%** et un **DPF max** de **0.81%** (Idem).

3.2.4 Limites des lumiducs

Selon Garcia-Hansen (2006), les performances des lumiducs sont liées à la présence de conditions d'ensoleillement optimales, ceci réduit leurs usages dans les pays à grandes latitudes. S'ajoute à cela, le cout important de leur maintenance dissuade la plupart des maitres d'ouvrages à les installer, d'autant plus que l'encombrement des lumiducs à grandes section dans certaines situations. Enfin, la majeure difficulté avec ce type de dispositifs, est l'impossibilité d'avoir de vue sur l'extérieur.

3.3 Ambiance lumineuse associée au lumiduc

3.3.1 Perception de la lumière diffusée d'un lumiduc

La perception de la qualité de la lumière est étroitement liée au DPF (Zhang et al, 2001). Une étude a été menée par l'université de Queensland en Australie évaluant le comportement des employés de deux immeubles dotés de conduits de lumière (Garcia-Hansen et al, 2010), le premier équipé de fenêtres et de régulateur d'éclairage automatique contrairement au deuxième, qui n'a ni des ouvertures sur l'extérieur, ni régulateurs automatiques d'éclairage (Idem).

Une différence persistait dans l'autogestion de la quantité de lumière transmise sur le plan de travail. Le bâtiment 1 était équipé de capteurs, il permettait d'avoir un taux d'éclairage de **500Lux** en moyenne -variation de **490 lux** à **540 lux** c'est à dire 4% de fluctuation moyenne- (Idem). G-Hansen affirme que cette fluctuation ne diminue en rien la capacité des occupants à percevoir le changement dans la nature de l'éclairage³¹ (Idem).

Ces régulations pourraient réduire considérablement l'effet de temporalité de la lumière extérieure (Mayhoub, 2012).

Par ailleurs, les fluctuations climatiques sont directement transmises par les conduits de lumière dans le cas où les régulateurs avec lampes électriques sont absents (Carter et al, 2006). Cela provoque une fatigue des yeux et une déconcentration signalée par les usagers eux-mêmes (Garcia-Hansen et al, 2010).

En effet toujours selon la même étude, les conditions lumineuses externes étaient reproduites à l'intérieur garce aux lumiducs, provoquant la perturbation de l'œil et faisant référence à des situations invisibles depuis l'intérieur causant le stress. Un employé a déclaré:

³¹ Cela devrait être vérifié

'I don't understand how you can survive in that environment when you have a bright screen and then you've this bright thing that goes off and on, off and on behind you. I just think it will strain your eyes' (Idem).

. Eblouissement :

Des mesures sur les plans de travail ont permis de démontrer le contraste que l'emploi d'un conduit de lumière à parois métallique pouvait provoquer (Idem). En effet, dans certains cas, les mesures donnaient un taux d'éclairage de **19000 lux**, alors que dans la limite de cette tache lumineuse, il n'y avait que **140lux**, ce qui représente un ratio de **1/135**, au même moment où le ratio de confort conseillé par la CIE est aux alentours de **1/50** (Idem). Ceci permet de nous renseigner sur le comportement du conduit de lumière à parois métallique comme ayant un comportement de spot lumineux (Baroncini et al, 2010, Garcia-Hansen et al, 2010, Paroncini et al, 2007, Zhang et al, 2001).

Le bâtiment 2 n'étant pas équipé de régulateurs, les mesures effectuées in situ démontrent un contraste beaucoup plus important des taux d'éclairage sur l'espace de travail (de **450lux** à **850lux** ce qui représente de **14 à 23%** de variations à des intervalles de mesures de 5 min dans plusieurs postes de travail) (Idem). Les employés ont déclaré que la lumière du lumiduc est variable, instable et parfois très inconfortable (Idem).

3.3.2 Effet de la lumière du lumiduc avec et sans fenêtre

Dans l'étude comparative de huit bâtiments de bureau en Grande Bretagne utilisant une autogestion de la lumière (Carter et al, 2009), il a été noté auprès des employés que le positionnement dans le champ de vision d'une fenêtre, avait plus d'effets bénéfiques sur la perception de la qualité de la lumière provenant des lumiducs.

Sur la question de la vue sur l'extérieur, l'étude de Garcia-Hansen (2010) a fait ressortir des réponses unanimes, stipulant que la vue est primordiale et que la diffusion du conduit de lumière à parois métalliques ne suffisait pas à elle seule pour avoir un confort visuel et lumineux intérieur en raison de l'absence de la vue, même si le lumiduc permettait de transmettre les effets lumineux extérieur du climat (Garcia-Hansen et al, 2010).

Toujours selon Garcia-Hansen et al (2010), le manque de vue sur l'extérieur est un facteur de gêne pour les employés (Idem). Plus encore, l'absence de fenêtre influence négativement la perception de la lumière parvenant du conduit de lumière. Selon carter et al (2009), elle est parfois même perçue comme une lumière électrique. Ce dernier rajoute que le conduit de lumière n'améliore pas forcément l'ambiance quand la fenêtre est absente (Carter et al, 2009).

Par ailleurs, Garcia-Hansen (2010) note qu'il n'y a pas d'amélioration dans la perception de la vue extérieure même avec un DPF augmenté. Elle ajoute que même l'ambiance procurée par les plus performants des lumiducs, reste inférieure à l'effet d'une fenêtre (Garcia-Hansen et

al, 2010). Carter et al (2009) rajoute que même si dans certains espaces de travail la moyenne du DPF était au-dessus de **1.5%**, seuls **33%** des employés percevaient la lumière comme étant de source naturelle (Carter et al, 2009).

La qualité de la lumière transmise est perçue de la même manière que pour un dispositif traditionnel (Garcia-Hansen et al, 2010). Ainsi, l'ajout au fond d'une salle sombre d'un lumiduc, apparaît comme une source créant un fort contraste dans la proximité immédiate du diffuseur. Ajoutée à une autre source lumineuse, cette lumière est perçue comme dissociée de l'ambiance lumineuse de l'espace intérieur (Idem).

3.3.3 Spectre lumineux transmis par un lumiduc

a. spectre lumineux : Ces dispositifs font généralement référence à une ouverture zénithale qui permet à la lumière naturelle de passer à travers un tube avec un minimum de pertes de lumière, sans transfert de chaleur (Malet-Damour et al, 2015, Laouadi et al, 2013, Baroncini et al, 2010). Cette lumière sans chaleur est la conséquence du filtrage des grandes longueurs d'ondes (IR) à partir de 900nm responsable des gains de chaleurs ainsi que des rayons UV responsables du ternissement des surfaces, de la lumière naturelle (Curt Maxey et al, 2008).

b. La couleur de la lumière naturelle : La longueur et la fréquence d'onde, permettent de déterminer la couleur de la lumière (M.C. Lam, 1986). Celle du lumiduc est liée à la qualité d'absorption ou de réflexion des parois réfléchissantes. Le conduit de lumière à parois métalliques permet d'avoir un spectre de lumière du jour complet avec une absorption de certaines longueurs d'ondes selon les types de films réfléchissants internes :

. Le film du conduit de lumière peut être constitué de plastique argenté, d'aluminium argenté poli ou d'aluminium (Nair et al, 2013). La lumière émise par les films argentés est rougeâtre, semblable à la lumière d'une lampe incandescente. Tant dis que celle émise par les films à aluminium est bleuâtre, similaire à une lampe aux halogénures métalliques (Idem). Tandis que ces mêmes conduits de lumière sont connus pour perdre en efficacité pouvant aller de 5% à 20% (Idem) (Cf. Annexe 2).

c. la forme de la source lumineuse : D'un point de vue photométrique, la source lumineuse qu'elle soit naturelle ou artificielle est caractérisée par sa taille, sa forme, son intensité, sa direction, sa localisation dans l'espace et sa distance à l'observateur ou à la surface éclairée (M.C. Lam, 1986). Suivant cette dernière, on peut distinguer trois types de sources : ponctuelle, linéaire, ou en forme de surface (M.C. Lam, 1986). Les conduits de lumières métalliques émettent une lumière ponctuelle tandis que les conduits de lumière prismatiques émettent une lumière linéaire le long du tube. Les lumiducs à fibre optiques sont le plus souvent disposés de manière à transmettre une lumière ponctuelle. Enfin les tunnels de lumière, grâce à l'alignement de leurs lentilles d'une part et au tube transparent qui les contient d'autre part, permettent d'avoir une diffusion linéaire de la lumière. La disposition successive des diffuseurs ponctuels pourraient donner le même effet qu'une diffusion linéaire (Cf. Figure 6-55, P. 138).

Le rendu des couleurs dans une étude d'évaluation des propriétés du matériau réflecteur des light pipes à corps creux (sans prendre en compte le capteur et le diffuseur), le résultat a démontré une influence de l'angle d'incidence sur la couleur de lumière transmise (Nilsson et al, 2014). En effet, au-delà d'un cône de 50°, la couleur de la lumière changeait (Idem).

3.4 Efficacité énergétique du lumiduc

Dans l'étude menée par Carter et al, (2009) sur des bâtiments en Grandes Bretagne, il note que la contribution du système de conduction de lumière (light pipe) était dans les meilleurs cas de 25% dans l'éclairage total des espaces de travail, tandis que 50 % était assurée par l'éclairage artificiel (Carter et al, 2009). Cela est valable aussi bien pour les conduits de lumière à parois métalliques, que les lumiduc à fibre optique. En effet, dans une étude du Oak Ridge National Laboratory (ORNL) aux Etats Unis sur le développement d'un lumiduc à fibres optiques (Curt Maxey et al, 2008) (commercialisé sous le nom de Sunlight direct), les tests dans l'un de 15 sites (McKinney 33° N, Texas, USA) où se sont tenues des expérimentations, ont démontrés une moyenne annuelle d'énergie conservée dépassant les 40kWh, et pouvant atteindre des pics de 86kWh comme au mois de Juillet 2008 (Curt Maxey et al, 2008). Les résultats sont visibles dans les graphiques suivants :

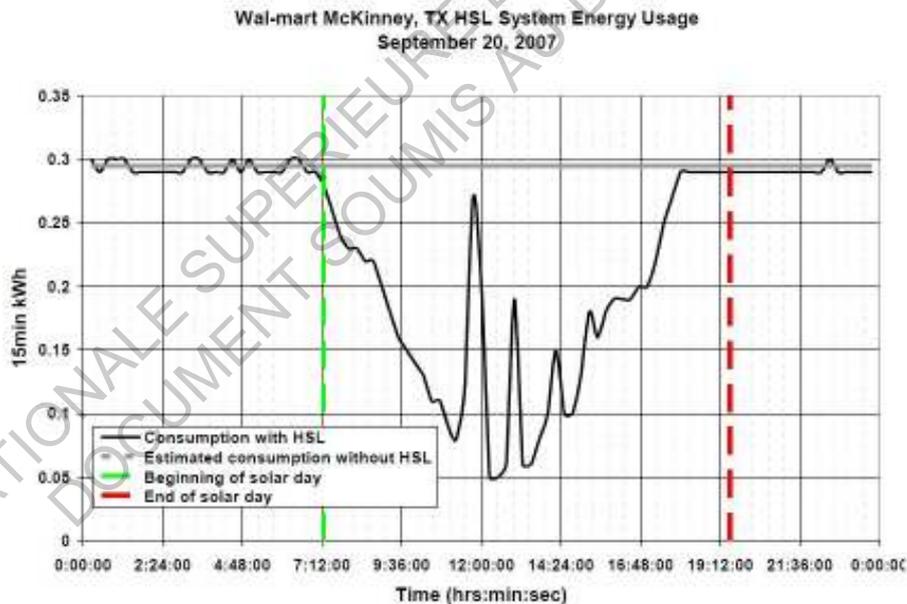


Figure 3-4 Graphique. Consommation énergétique pour la journée du 20/9/2007. (Curt Maxey et al, 2008)

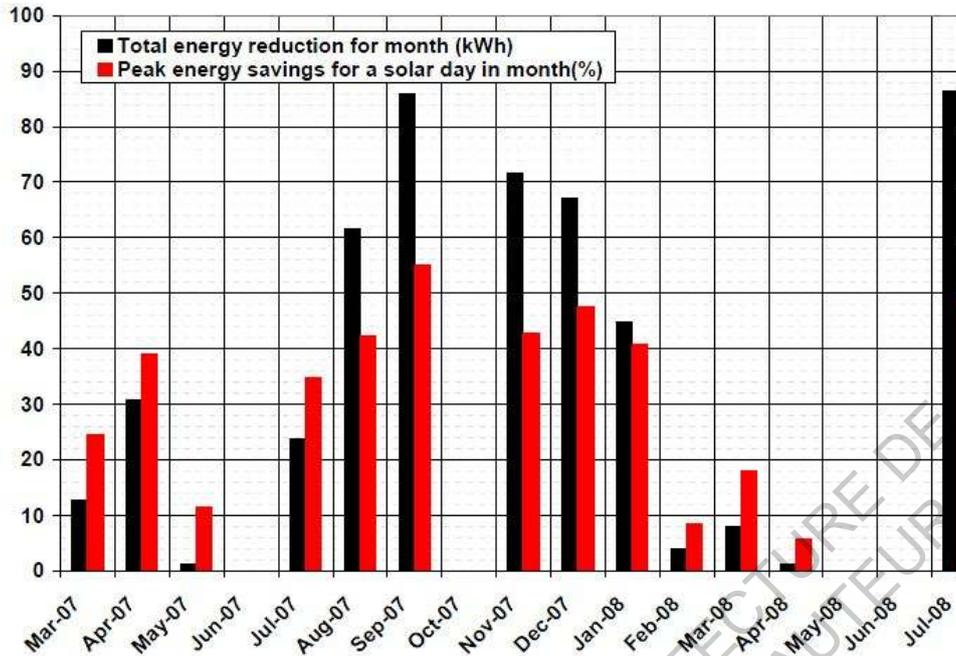


Figure 3-5 Graphique. Consommation énergétique de Mars 2007-Juillet 2008 (Curt Maxey et al, 2008)

3.5 Illustrations de projets d'architecture avec des lumiducs

Les exemples de projets que nous avons sélectionnés ne sont pas exhaustifs, mais nous les avons choisis en raison de la participation des lumiducs dans la définition de la forme intérieure éclairée (profonde). De plus, ils représentent le principal dispositif d'éclairage naturel de ces espaces³².

3.5.1 Centre de distribution européen de 3M, Projet EU d'Arthelio, Carpiano. Italy

Le lumiduc de cet exemple, est conçu par le bureau d'étude Ricerca & Progetto - Bologna and A.L.C.S. – Asti dans le cadre du projet européen ARTHELIO. Il est installé dans le bâtiment de 3M; centre européen de distribution de la marque spécialisé en ingénierie, à Carpiano près de Milan en Italie (45° N).

Le lumiduc comme solution pour le projet :

L'objectif derrière l'installation d'un lumiduc dans ce projet, était d'éclairer l'espace de stockage qui n'a aucune prise de lumière naturelle, en faisant rentrer les effets lumineux extérieurs pour améliorer le confort visuel des employés (Mingozzi, 2001).

Type de source de lumière :

Une source artificielle composée de deux lampes de sulfure montées sur deux tubes transporteurs horizontaux, et une lumière naturelle verticale avec un lumiduc (à miroirs). Les

³² Ces exemples ont été réalisés en collaboration avec Agarwal Aditya, à l'occasion de son stage au CRENAU.

deux sources sont séparées dans le but de garder l'effet psychologique positif de la lumière naturelle (Idem). De plus, les lampes artificielles n'étaient utilisées que dans le cas d'un ciel couvert ou par nuit (Idem).

Le capteur

Le capteur actif installé sur le toit, est composé d'une lentille Fresnel montée sur un axe de rotation vertical (Figure 3-6). Sa forme inclinée permet de couvrir toutes les hauteurs du soleil supérieur à 15° (levé et couché du soleil), et tous les azimuts. Les rayons réfractés à travers la lentille, sont réfléchis sur un réflecteur anidolique (forme parabolique) qui les transmet vers l'intérieur du tube.

Le tube

Le tube est de forme cylindrique verticale, qui mesure 90cm de diamètres et 13m de longueur. Il est doublé à l'intérieur par un film polymérique multicouches, dont l'indice de réflectivité est supérieur à 99% (Figure 3.7) (Idem).

Le diffuseur

Comme il n'était pas possible de distribuer la lumière dans l'ensemble de l'espace de travail, la lumière a été concentrée sur un diffuseur en polycarbonates, conçu de manière à donner l'impression d'une fenêtre latérale (Idem). Selon les concepteurs, sa forme peut être perçue depuis des distances éloignées dans le but de stimuler une sensation psychologique positive et procurer un sentiment de contact à l'extérieur. La surface éclairée naturellement par le diffuseur est d'environ 14m² (Figure 3.8) (Idem).

Stratégie d'éclairage :

Des capteurs de luminosité sont installés sur le toit pour permettre la régulation du taux d'éclairage automatiquement en augmentant ou réduisant, avec des ballasts de 1000w, l'intensité des lampes électriques installées avec le lumiduc dans les situations climatiques défavorables.

Il intègre alors le système d'éclairage naturel dans une stratégie globale de réduction de la consommation d'énergie.

En journée les valves aux deux extrémités du diffuseur sont fermées pour séparer les sources de lumière. Le diffuseur est alors éclairé uniquement par la lumière naturelle, le taux de lumière varie de 200 à 260lux dans un rayon de diffusion de 10m. La nuit tombée, la lumière artificielle prend le relais.

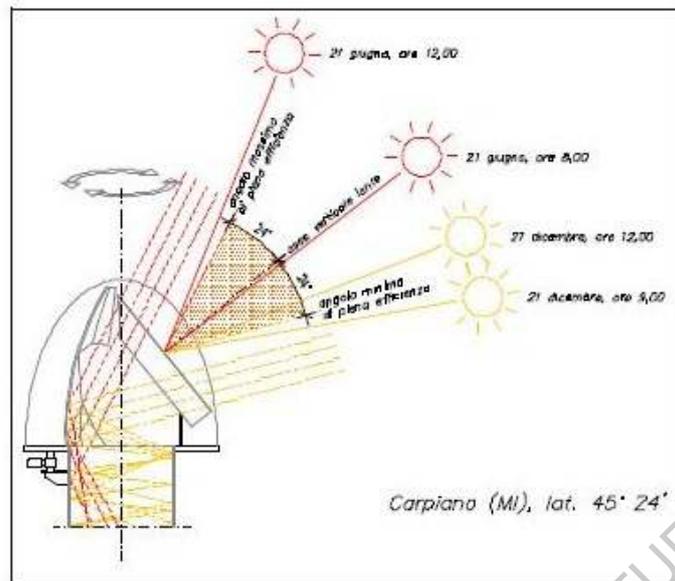


Figure 3-6 Coupe. Capteur de Projet Arthelio. Carpiano (Mingozzi, 2010)

Performance lumineuse :

Le taux d'éclairage a été fixé à 200lux sur le plan de travail (à 75cm du sol), en raison des exigences de sécurité et de tâche nécessaires (lecture d'étiquettes). Des taux de 890lux ont été enregistrés sous des conditions de ciel optimales (Idem). Une moyenne générale a été enregistrée de DPF > 2% (l'objectif était de 2%) (Idem). Un facteur d'uniformité a été mesuré comme étant supérieur à 0.8 (ratio entre la valeur d'éclairage minimale et la valeur principale d'éclairage) (Idem).

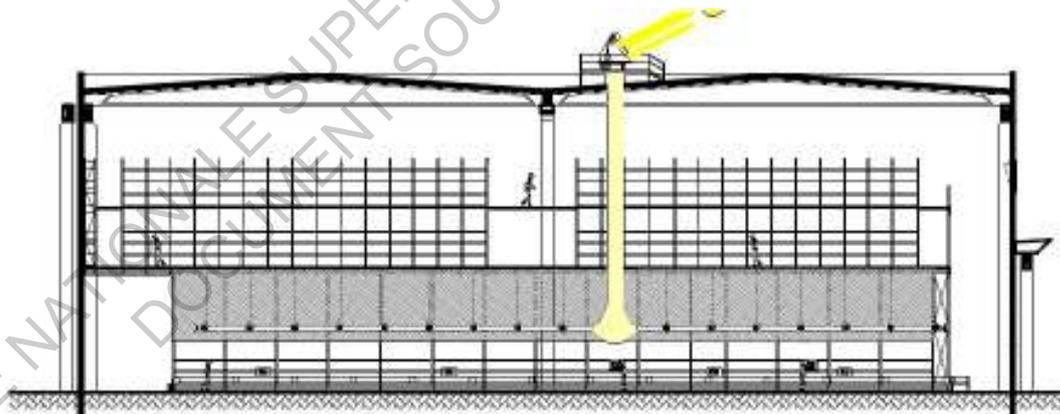


fig. 3: System with mobile collecting head unit (one axis rotation): daylight transport for about 13 meters and extraction in a defined position; combination with artificial light coming through lightpipes. System is installed in 3M EDC Carpiano, Milano (design: Ricerca e Progetto, Bologna: ALCS, Asti).

Figure 3-7 Coupe. Tube canalisateur. Projet Arthelio. Carpiano (Mingozzi, 2010)

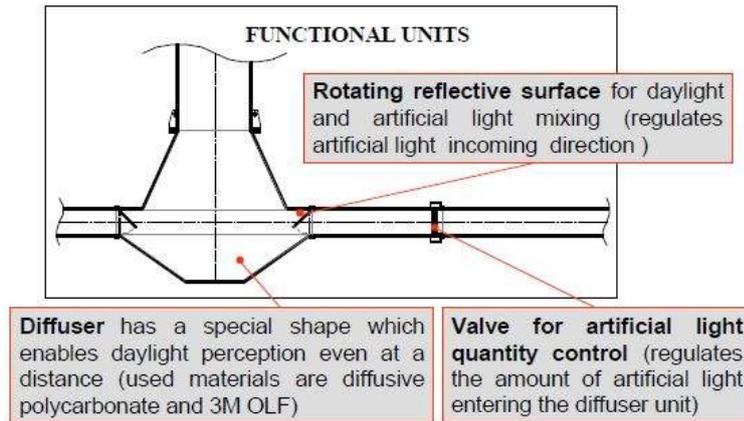


Figure 3-8 Coupe. Tube canalisateur. Projet Arthelio. Carpioano (Mingozzi, 2010)

Ambiance :

Le tube opaque à parois réfléchissantes, permet d’avoir toute la lumière dans la partie extrême du tube. Le système est incorporé dans une stratégie d’éclairage mixte qui permet de réduire la consommation d’électricité, mais surtout pour procurer un lien à l’extérieur. Dans ce sens la lumière naturelle du lumiduc est sensée optimiser le confort intérieur (Idem).

Energie :

L’efficacité énergétique enregistrée dans les 14m² éclairées en 6 heures par jour et pendant une année est de 182.5Kwh d’énergie électrique économisée (Idem).



Figure 3-9 Photographie. Diffuseur. projet Arthelio. (Mingozzi, 2001)

Forme :

L'espace éclairé se trouve à 13m de la toiture, il est relié à l'ambiance extérieure grâce au diffuseur. Le diffuseur dont la forme est une pyramide retournée permet d'avoir une sorte de clairière, terme qui a été utilisé par les personnes interrogées dans le cadre d'une étude sur la perception de l'éclairage des espaces souterrains (Derlande, 2014).

3.5.2 The Low Line: jardin urbain souterrain sous New York, Etats Unies

Contexte :

New York, est connu pour être une des grandes villes denses au monde. En octobre 2015 a été inauguré le premier Park urbain souterrain au monde, dont l'apport en lumière du soleil dépend uniquement des lumiducs. Le projet mesure plus de 4000m² où un nombre d'arbres et de végétaux ont pris place pour évaluer leur adaptation à cet environnement.

Le lumiduc comme solution pour le projet :

Le projet a pris place dans une ancienne station de tram souterraine. La seule solution pour l'occuper était selon le chef de projet Dan Barasch d'y introduire la lumière du soleil et créer une ambiance lumineuse différée.

Un plafond spécial appelé *conopée* a été monté pour donner une impression d'être à l'extérieur, et minimiser le sentiment d'enfermement ressenti dans le lieu. Pour ne dépendre que des lumiducs dans l'éclairage, les lanterneaux existants sur les toitures sont rendus complètement opaques.

Stratégie d'éclairage :

L'éclairage est assuré par la lumière naturelle des lumiducs. L'installation lumineuse intérieure comporte des sources de lumière artificielle en LED afin d'avoir un niveau constant de luminosité augmentant et diminuant l'intensité selon les conditions extérieures du ciel.

Type de lumiduc :

Le transport de la lumière se fait grâce à deux types de lumiducs : Le Suncentrale, et le Sunportale. Le premier est principalement un conduit de lumière équipé de canopée dans le plafond et à parois réfléchissantes, le second est un tunnel de lumière (alignement de lentilles).



Figure 3-10 Photographie. Lowline. NY (thelowline.org)

Le conduit de lumière :

Suncentrale, la société canadienne a monté six modèles de son SunBeamer™ 100, qui consiste en un anneau équipé de lamelles pivotantes à l'intérieur, semblables aux lamelles des stores, et qui sont auto-configurées par GPS pour suivre la position du soleil et transmettre une lumière verticale collimatée (Cf. Annexe 8, p. 127). Les tubes sont montés sur une canopée qui augmente l'impression d'ensoleillement à l'intérieur. L'intention de base était d'avoir un lumiduc à fibres optiques.

la canopée :

Afin de pouvoir disperser la lumière aussi loin que possible, un système de canopée tessellée composé de 600 panneaux hexagonaux et triangulaires en aluminium anodisé (pour une meilleure résistance à l'usure, la corrosion et la chaleur) d'épaisseurs de 1/8 pouce coupés au laser et pliés dans une presse hydraulique, a été installé sur le plafond pour un poids totale de plus de 600 kg.

Tunnels de lumière SunPortal :

Le dispositif est indépendant du premier. Sur la toiture sont disposés des capteurs (miroirs héliostats) et des collimateurs (Figure 3-11), à l'intérieur un alignement de lentilles est disposé au niveau du plafond (Figures 3-12). Malheureusement, aucune donnée sur la performance de cette installation n'est communiquée (Cf. Annexe 8, p. 140).



Figure 3-11 Image. Capteurs. Lowline. NY (thelowline.org)



Figure 3-12 Photographies. A droite tube canalisateur. A gauche la Canopée. Low Line NY. (thelowline.org)

Ambiance :

La canopée peut être considérée comme la partie la plus importante du dispositif en raison de la diffusion de lumière naturelle à l'intérieur et de l'optimisation de l'effet d'ensoleillement. En effet, elle est conçue de manière à éviter l'éblouissement des occupants tout en ayant le maximum de luminosité. Les panneaux coupés au laser (Laser cut panel (Cf. 1.5.4.)), représentent des surfaces permettant grâce à l'angle de déviation qu'ils réalisent de maîtriser le confort visuel dans l'espace.

Ambiance et forme d'espace profonde :

La fermeture des lanterneaux sur la toiture du bâtiment, a mis une séparation entre l'espace intérieur et extérieur. En effet, l'ensemble de la toiture a été couvert d'une couche noire pour ne laisser pénétrer que la lumière des lumiducs. De plus, la profondeur qui sépare l'intérieur de l'espace de la surface n'est pas aussi importante. On peut se demander sur la raison qui a amené les concepteurs du projet à ne plus dépendre des lanterneaux pour assurer un éclairage naturel, même si ces derniers sont bien plus performants et permettent d'avoir une vue sur le ciel.

D'un autre côté, on peut se poser la question sur le type d'image et de d'expression qu'une telle forme urbaine aveugle, fermée et avec des capteurs à l'extérieur peut avoir dans le paysage urbain. Plus encore, on peut se demander si le lumiduc n'est pas un facteur déterminant la fermeture ou l'ouverture de la forme urbaine qu'il permet d'éclairer.



Figure 3-13. Photographie. Tunnel de lumière. Lowline. NY (thelowline.org)

3.5.3 Bâtiment de la faculté de génie civil de l'université de Minnesota. Etats Unis

Contexte :

Construit en 1983, le bâtiment de la faculté de génie civil de l'université de Minnesota aux Etats Unis, a intégré un espace profond exclusivement éclairé par un lumiduc de type tunnel de lumière intégrant un système de lentilles alignées. Son architecte D.J. Bennett, est l'un des pionniers de l'architecture solaire optique des années 1970 (Lambeth, 1977), il est connu pour son militantisme en faveur des espaces souterrains. Il a réalisé plusieurs projets aux

USA dont l'ambiance lumineuse repose sur les systèmes optiques. Selon l'architecte, ce projet équipé d'un lumiduc ainsi que d'un périscope est le plus ambitieux qu'il ait réalisé³³.

Type de lumiduc :

Ce lumiduc est équipé de dix miroirs héliostats de 1.5m² chacun, qui sont montés sur le toit. Combinées verticalement, 13 lentilles permettent de transporter et focaliser la lumière collectée. Le système, devait théoriquement permettre de transporter un éclairage de 1000 lux dans un espace de 400 m² se trouvant à 7 niveaux en sous-sol (Garcia-Hansen, 2006).

Performances :

A l'issue des processus optiques aux niveaux des lentilles, 28% seulement de la lumière collectée pouvait atteindre cet espace (Idem). Les mesures ont démontré une moyenne de 17% de transmission lumineuse réalisée (Idem).

Inconvénients :

Les facettes des lentilles étant disposées horizontalement, l'inconvénient principal était l'accumulation de poussière sur leurs surfaces causant une perturbation du processus de transmission de la lumière à chaque passage de lentille (Idem).

Les lentilles ont récemment été démontées à cause des coûts de maintenance élevés comparés à leur efficacité (Idem). Seuls les héliostats sont maintenus pour éclairer le vide qui servait de tube pour les lentilles alignées.

Ambiance :

L'architecte a souhaité agir sur la mauvaise image rattachée aux espaces souterrains (effet d'enterrement, faible luminosité, effet d'enfermement) en les transformant à des espaces de vie.

3.5.4 Héliobus, Lumiduc à tube prismatique, Suisse

Le tube est utilisé comme transporteur de lumière et comme luminaire distributeur de lumière.

Le collecteur est couplé à un collimateur pour avoir plus de rayons droits et une lampe artificielle. Le tube fait 9.9m de longueur et est constitué d'acrylique et couvert d'un film prismatique nommé SOLF, avec une section carrée de 65cm X 65cm. A l'intérieur de ce tube, au niveau de chaque étage, se trouve un deuxième tube en acrylique de 2m de longueur et de section carrée de 10cm X 20cm, installés pour à la fois extraire la lumière dans les étages et transmettre le reste aux niveaux inférieurs jusqu'au diffuseur. Le facteur de transmission

³³ <http://davidjbennettarchitect.net/>

solaire (DPF) est en moyenne de **30%** avec une valeur moyenne d'éclairage de **100 lux** en 5 heures par jours (Garica-Hansen, 2006).

L'éclairage est jusqu'à 3 fois plus important dans les espaces traversés. Cependant, le centre des pièces est très éclairé par rapport aux murs alentours notamment en journée ensoleillée, ce qui provoque un éblouissement (Idem). Cet éblouissement revient au fait que la source de lumière se trouve au niveau de l'observateur.

Le taux d'éclairage naturel intérieur selon la source de lumière est le suivant : avec une lumière naturelle seulement : **480lux** en moyenne étaient mesurées dans l'étage supérieur à midi et **220lux** dans les étages inférieurs. Avec une lumière artificielle ajoutée : le taux d'éclairage a atteint **822lux** au plan supérieur et **671lux** au plan inférieur.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

4 Chapitre 4 : Lumiduc et forme urbaine : étude prospective

4.1 Introduction

Architectes et historiens ont toujours cherché à identifier les facteurs qui déterminent la forme des édifices. Celle-ci naît traditionnellement d'une synthèse d'éléments tels que les matériaux et les techniques à disposition, la topographie et le climat, le contexte social, les coutumes et les croyances religieuses. Ainsi, reconnaître un style de forme, consiste à s'interroger sur les influences qui sont à la base de ce style (Miles, 2010).

Aujourd'hui, de plus en plus d'architectes s'intéressent à l'expression architecturale en partant des questions environnementales liées à la gestion de la ressource matérielle et énergétique. Ainsi, la nouvelle architecture durable repose de plus en plus sur des choix de procédés (matériaux écologiques, techniques naturelles, recherche de confort lumineux...etc) qui s'expriment souvent par des innovations formelles (Idem).

Dans ce chapitre nous souhaitons questionner le devenir de la forme architecturale et urbaine résultant de l'intégration de lumiducs comme seuls dispositifs d'éclairage naturel de l'espace intérieur et ce à travers une étude prospective.

4.2 Méthode

Premièrement, nous avons déterminé des catégories de lumiducs suivant l'orientation : horizontale ou verticale et selon la section du tube : grande ou petite (Tableau 4-1). Chaque catégorie possède une ou plusieurs formes de diffusion à l'intérieure de la forme architecturale et urbaine. L'étape suivante consiste à effectuer une analyse en deux parties : une analyse paramétrique architecturale et une analyse thématique urbaine.

Orientation	Section
Horizontale	Grande
Verticale	Petite

Tableau 4-1 Paramètres des lumiducs

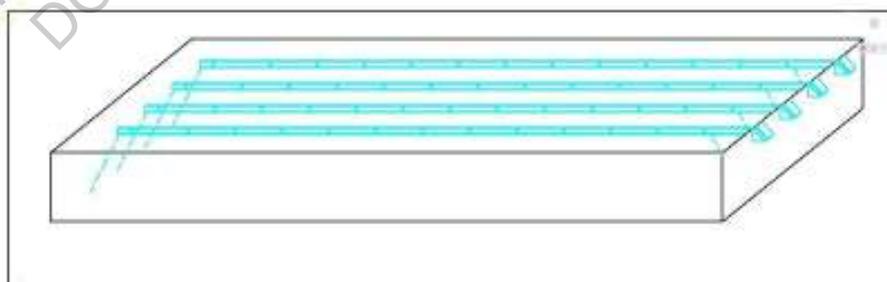
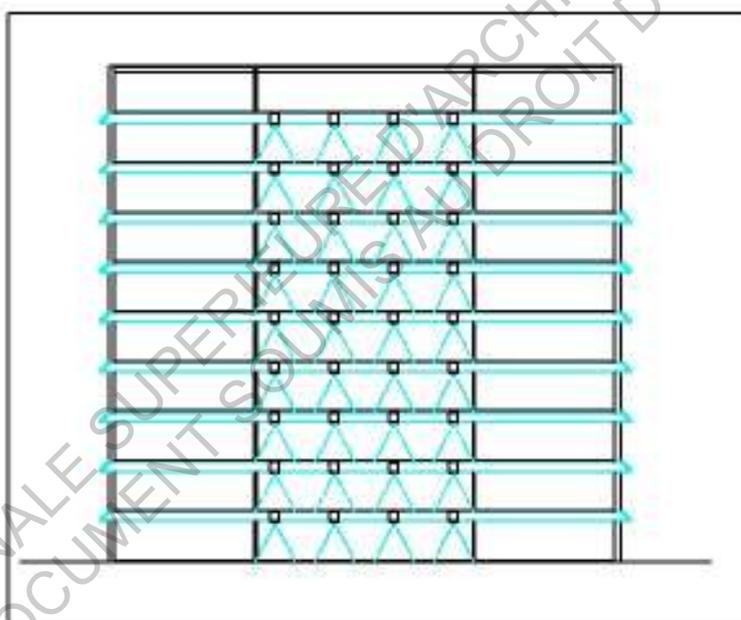
Le lumiduc horizontal signifie que le capteur est installé sur la façade (surface verticale), tandis que le lumiduc vertical signifie que le capteur est installé sur la toiture, voire sur le sol (surface horizontale). Les lumiducs à grande section comprennent : les lumiducs métalliques, prismatiques et les tunnels de lumière. Tandis que le lumiduc à petite section est constitué de fibre optique.

4.2.1 Croisement

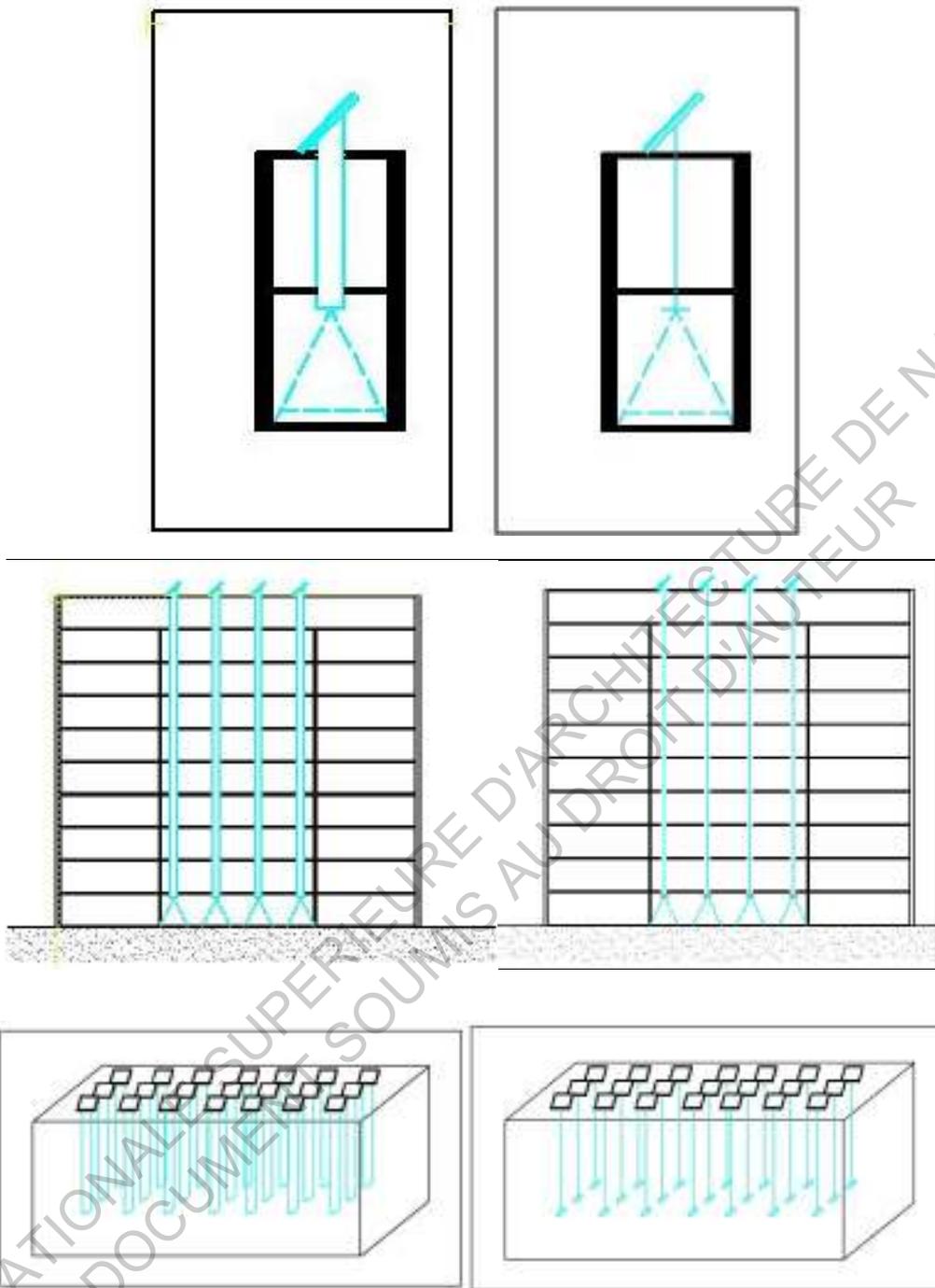
En croisant ces paramètres nous avons déterminé quatre catégories de lumiducs (Tableau 4-2). Les Figures 4-1 et 4-2, sont des schémas représentatifs de ces lumiducs.

Catégories de lumiducs
Lumiduc Horizontal à grande section
Lumiduc vertical à grande section
Lumiduc vertical à petite section
Lumiduc horizontal à petite section

Tableau 4-2 Catégories de lumiducs



Figures 4-3 Lumiduc horizontal à grande section



Figures 4-4 Lumiduc vertical à grande section (à gauche) et Lumiduc vertical à petite section (à droite)

4.3 Analyse paramétrique architecturale

Celle-ci comprend le lien du lumiduc aux paramètres que ce soit la façade, la toiture, le sol, le plafond, le plancher ou le mur. Les paramètres tels que la hauteur et l'épaisseur du bâtiment ou l'espace technique intérieur sont également traités.

4.3.1 Lumiduc et façade

Lorsque nous parlons de densité, une des questions essentielles dans le débat sur la forme urbaine est la question de la façade, aussi bien sur la frontalité urbaine que sur l'expression architecturale (Lamunière, 2004). Par définition, la façade représente la face avant ou le principal coté ayant reçu un traitement architectural formel (Miles, 2010).

L'élément affectant la façade est le capteur du lumiduc horizontal (Figure 4-1). Si des lumiducs horizontaux étaient implantés sur un bâtiment pour l'éclairage d'espaces éloignés de la façade, alors l'éclairage s'effectuerait sur un seul niveau à la fois (plancher). Dans ce cas-là, l'esthétique, la géométrie, le rôle et dans un cas plus général le paysage urbain se retrouveraient directement affectés. De plus, un rapport formel et sensoriel entre les façades des bâtiments pourrait être ressenti sur la forme de la rue (gabarit) et sur les ambiances entre intérieurs et extérieurs (rapprochement/ éloignement de façades, création de nouvelles façades à l'intérieur des formes architecturales, transformation des usages). Le rapport du lumiduc à la rue sera développé dans la deuxième partie de notre analyse (Cf.4.4.1).

Technicisation et esthétique de la façade : si nous envisageons d'avoir des lumiducs sur la façade, en vue de faire écho à l'évolution d'un contexte urbain de plus en plus dense, l'enveloppe et spécialement la façade se métamorphoserait pour jouer un nouveau rôle au gré de son esthétique. Dans ce cas, on pourrait parler d'une « spécialisation de la façade » au lieu de parler de « style de la façade ».

On pourrait assister à une diminution de son rôle de vitrine du bâtiment, en devenant dans ce cas, un support à la fois de communication des espaces périphériques éclairés à travers les fenêtres traditionnelles, et le biais par lequel transite la lumière naturelle vers les espaces profonds n'ayant pas de contacts physiques avec l'extérieur. Comme les lumiducs n'obéissent pas en priorité à des aprioris esthétiques mais plutôt techniques, la forme de la façade, dont les ouvertures, pourrait s'adapter à la géométrie des capteurs afin d'avoir une harmonie d'ensemble et une meilleure intégration dans le contexte urbain.

Épaisseur de la façade : Par ailleurs, une présence d'une stratégie d'éclairage basée sur des lumiducs horizontaux, impliquerait la présence d'un nombre important de capteurs sur la façade, ce qui aurait pour conséquence une augmentation de son épaisseur. Ces effets seraient visibles à différents degrés selon l'orientation des façades.

Le capteur développé par L.Whitehead dont le lumiduc baptisé « Solar canopy », est l'exemple parfait d'un lumiduc horizontal (Figures 4-1) dont les effets se font ressentir sur l'épaisseur de la façade comme l'illustre la figure (4-5).



Figure 4-5 photographie. capteur du Solar Canopy de L. Whitehead. (Source: youtube.com)

4.3.2 Lumiduc, toiture et sol

La forme de la toiture est traditionnellement plate, en double versant, inclinée ou ondulée selon les régions. Considérée comme la cinquième façade, sa forme a évolué depuis la Mésopotamie. Elle est également appelée la façade du ciel ou cinquième façade (Stevens et al, 1998).

Parallèlement à la toiture, il est également question de la surface du sol qui inclue les formes urbaines souterraines. Les lumiducs concernés par ces paramètres architecturaux sont les lumiducs verticaux et spécialement les capteurs. Ses derniers ont un avantage sur les lumiducs horizontaux pour leur vue optimale sur la voute céleste (Kwok, 2011).

Toiture à usages multiples: si un nombre important de capteurs est présent en toiture, alors l'accessibilité à cette dernière pourrait être réduite de son usage (Figures 4-2), ce qui veut dire que l'espace alloué aux capteurs devrait être pris en considération dès la phase de programmation du projet, de la même manière que les installations de ventilation déjà présentent.

Epaisseur de la toiture: par ailleurs, une application d'une stratégie d'éclairage basée sur des lumiducs verticaux, impliquerait la présence d'un nombre important de capteurs sur la toiture, ce qui aurait pour conséquence une augmentation de son épaisseur. Ces effets seraient visibles à différents degrés selon la hauteur du bâtiment.

Evolution en coupe : si les lumiducs verticaux sont implantés dans un bâtiment, celui-ci se développerait systématiquement en coupe en permettant l'éclairage de niveaux superposés les uns sur les autres (Figures 4-2) contrairement aux lumiducs horizontaux qui permettraient l'éclairage d'un niveau à la fois (Figure 4-1).

La multiplication des surfaces horizontales : par ailleurs, si la toiture est le support adéquat pour un capteur, une stratégie d'éclairage reposant exclusivement sur les lumiducs pourrait voir l'augmentation de la surface horizontale irradiée allouée sur l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment, afin de permettre l'installation du nombre nécessaire de capteurs. Cette multiplication aurait pour conséquence la réapparition de modules urbains de formes pyramidales qui se rapprocheraient du modèle de la ville utopique d'Ecopolis de Guy Rottier (Figure 2-19). De plus, nous pourrions assister à l'apparition d'un modèle optimisé des bâtiments à gradins tels que ceux dessinés par l'architecte Henri Sauvage au début du siècle dernier³⁴ comme l'illustre la Figure 4-4.

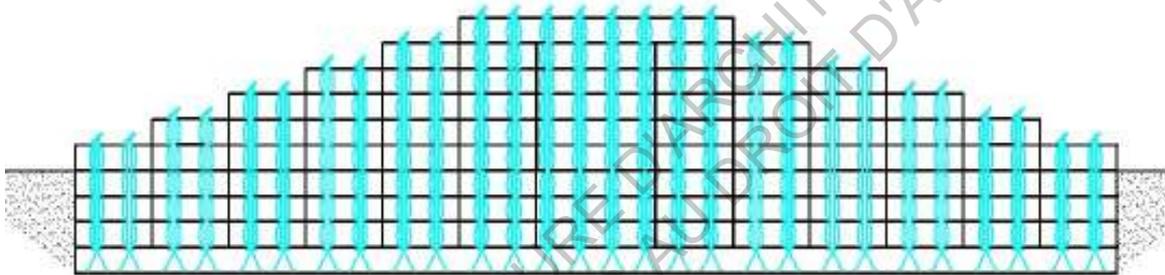


Figure 4-6 Schéma. Multiplication des surfaces horizontales

Hauteur du bâtiment : Si des bâtiments de faibles hauteurs présents dans un environnement construit dense se basaient sur les lumiducs verticaux pour assurer un éclairage naturel de leurs espaces intérieurs, alors l'exposition solaire des capteurs présents sur leurs toitures pourrait être réduite, ce qui pourrait signifier la recherche de plus de surfaces horizontales exposées au rayonnement solaire. La forme architecturale pourrait être affectée par l'inclusion des éléments suivants :

Des toitures suspendues : des dalles horizontales pourraient naître, disposées sur des supports (pilotis) élancés au-dessus de la toiture, voire en porte à faux (Figure 4-6) que nous pourrions appeler : toitures suspendues (Figure 4-5) qui représenteraient une sorte de canopée architecturale servant d'assise pour plusieurs capteurs à la fois. De la même manière, nous pourrions faire appel à des mats indépendants. Dans ce dernier cas, sa surface horizontale au sommet n'étant pas importante, le mat ne supporterait pas assez de capteurs lorsqu'une grande quantité de captage est exigée. Les lumiducs pourraient faire appel à un ensemble de mats qui prendraient place soit dans un espace urbain, soit

³⁴ Pour plus de détails, voir la référence : **Abdelhalim Redjdal**, *Les immeubles à gradins d'Henri Sauvage : analyse solaire, lumineuse et aéraulique*, Thèse de Master, sous la direction de D. Siret, ENSA Nantes, 2004

constituer un réseau de pylônes, indépendants de la forme architecturale concernée par l'éclairage naturel.

Spécialisation de la toiture : ainsi, nous assisterions une fois encore à une spécialisation d'un paramètre architectural : d'une part une « toiture- support » inaccessible, et d'autre part une « toiture-espace de vie » accessible.

Dans un autre registre, si les capteurs en toiture seraient apparents, il participeraient au dessin du Skyline urbain en s'imposant comme élément de la silhouette du bâtiment. Ce point de vue sera développé dans la partie lumiduc et silhouette urbaine (Cf. 4.4.3.).

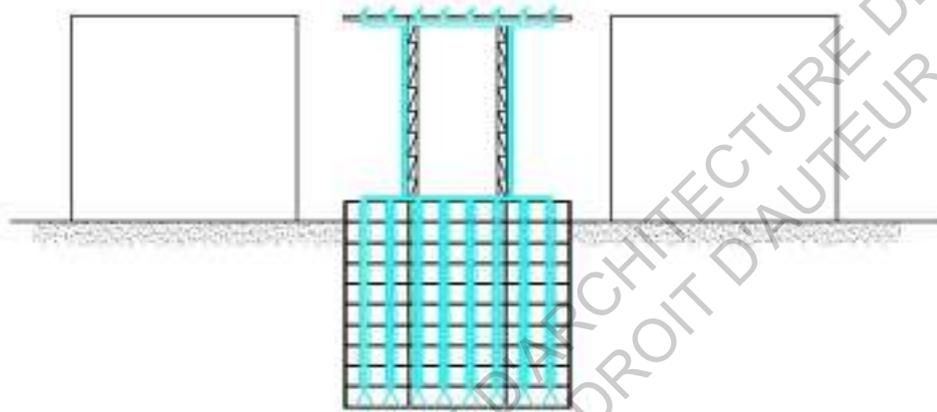


Figure 4-7 Coupe Schématique. Toiture suspendue



Figure 4-8 Photographie et coupe. Bâtiment multifonctionnel. J. Nouvel. Central Park, Sidney, Australie (pinterest.com). Bien que cet exemple de dispositif tend plus vers un plafond réflecteur servant pour éclairer la partie centrale du bâtiment que pour la toiture suspendue que nous venons de décrire, il nous permet néanmoins d'avoir une vision sur la forme de duplication possibles des surfaces horizontales dont les capteurs de lumiducs verticaux pourraient faire appel pour avoir une plus grande vue du ciel.

Un réseau de toitures : toujours si le bâtiment présente une hauteur faible vis-à-vis de son contexte urbain, nous pourrions assister à la création d'un réseau aérien de lumiduc, exploitant les toitures comme gisements de lumière naturelle (en plus de l'exploitation alimentaire végétale et énergétique solaire déjà existante à ce niveau³⁵).

La toiture-sol facteur d'ambiance lumineuse du bâtiment sous-terrain : Plus la hauteur d'un bâtiment est faible, plus sa ou ses toitures se rapprochent jusqu'à se confondre avec le sol impliquant l'existence d'espaces souterrains profonds. D'un point de vue paysagé, les capteurs pourraient être de plus en plus visibles depuis le niveau de la rue. La toiture/sol dans ce cas-là deviendrait la paramètre le plus important dans l'ambiance lumineuse intérieur en étant le support des capteurs. Le Bâtiment utopique du Depthscaper au Japon (Figure 2-17) en est l'illustration parfaite de cette métamorphose urbaine, où la toiture jouerait un rôle très important. Nous avons repris le même schéma dans les Figures 4-7 et 4-8.

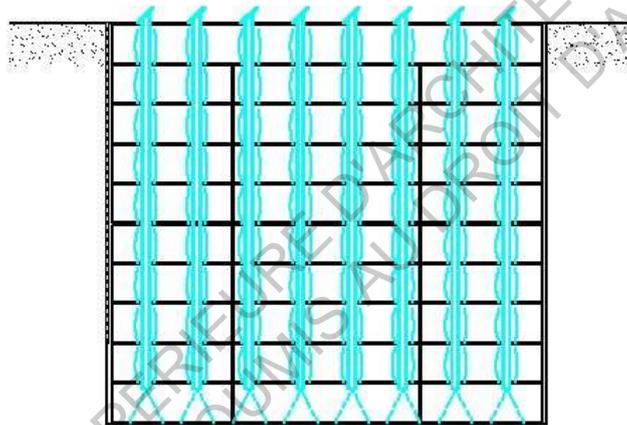


Figure 4-9 Schéma. La toiture confondue avec le sol (toiture = RDC)

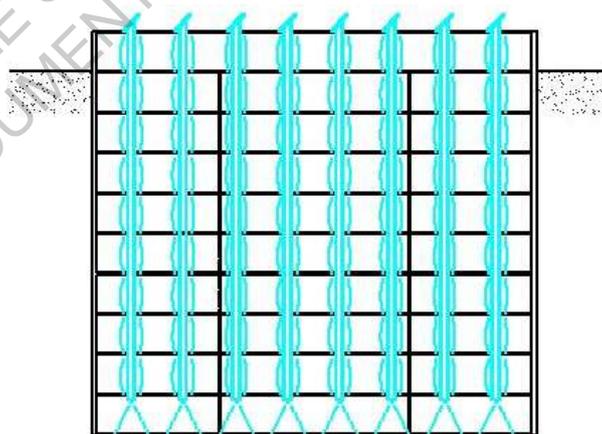


Figure 4-10 Coupe Schématique. La toiture tendant à se confondre avec le sol (toiture = R+1)

³⁵ Pour plus de détails sur ce thème, se référer à l'ouvrage : **Alena Prochazka et al**, *Toit urbain, les défis énergétiques et écosystémiques d'un nouveau territoire*, Presse de l'Université Laval, 2015

4.3.3 Lumiduc et plafond

A l'intérieur de la forme architecturale, le paramètre principal concerné par l'usage du lumiduc est le plafond. Constituant la base inférieure, le forme du plafond est traditionnellement définie par le plancher, la toiture ou la voute. Plus généralement, le plafond est une surface plane intérieure surplombante (Miles, 2010).

La surface du plafond est une expression structurelle, une de ses facultés est de permettre une communication avec les niveaux supérieurs (dont la transmission des ambiances). Pour des raisons de commodité un faux plafond peut s'en substituer. Celui-ci peut redéfinir la forme et le caractère du volume intérieur grâce à son indépendance de la structure du plancher.

Le faux plafond peut avoir de nombreuses fonctions comme : le stockage des réseaux de flux énergétiques ainsi que leur transmission dans l'espace intérieur (lumière, électricité, air conditionné), le contrôle de la hauteur de la pièce en cherchant une harmonie géométrique, être le support d'ornementations (trompe l'œil, fresques en perspective...etc) ou encore représenter un élément d'aménagement intérieur à travers sa texture, couleur, géométrie...etc.

Les éléments du lumiduc dont le plafond est affecté sont essentiellement le tube canalisateur et le diffuseur. Ainsi, nous distinguons les tubes lumineux à la fois canalisateurs et diffuseurs (tubes prismatiques, tunnels de lumière) et les tubes à diffusion ponctuelle (tubes métalliques et diffuseur de fibres optiques) qui se limitent au transport de la lumière naturelle et la diffuser dans au point extrême du tube.

Epaisseur du plafond : Si des lumiducs horizontaux étaient installés pour éclairer des espaces intérieurs profonds, le faux plafond verrait son épaisseur augmenter, et face à l'exigence du maintien de la hauteur intérieure utile (2.5m), ceci aurait pour conséquence l'augmentation de la hauteur du bâtiment. Dans le cas de tubes lumineux (grande section (Figures 4-1), ce volume ne serait pas perdu mais bien au contraire exploité, et permettrait aux plafonds de reproduire ce qu'on peut appeler des ciels différés. Tandis que si la diffusion est ponctuelle, l'espace occupé par le tube métallique provoquerait une perte de ce volume.

Encombrement : l'usage des lumiducs horizontaux, provoquerait un inconvénient majeur celui de l'encombrement, amplifié par la présence d'une autre épaisseur, celle des gaines d'aérations. Dans ce contexte, une étude prospective a été menée par Mayhoub (2013) proposant de prendre certaines parties des deux systèmes de canalisation pour n'en faire qu'une seule dans le but de diminuer leur impact sur l'espace intérieur.

Si un espace profond est éclairé par des lumiducs verticaux (Figures 4-2), leurs tubes n'auraient pas d'impact significatif sur l'épaisseur du plafond. De même que si des lumiducs horizontaux de section petite (fibre optique) étaient installés.

Cependant, ce que nous avons constaté est que la plupart des fabricants de lumiducs restent sur la lignée d'un éclairage naturel intérieur provenant du plafond, au même moment que le lumiduc permettrait une très grande flexibilité de diffusion comme le mur ou le plancher.

4.3.4 Lumiduc et plancher

Si des lumiducs horizontaux sont installés le long du plancher, alors les mêmes effets perçus sur le plafond en ce qui concerne l'épaisseur seraient reproduits, on parlerait de « faux plancher » ou de « plancher rehaussé ». En maintenant la hauteur intérieure utile (2.5m), cette épaisseur supplémentaire viendrait s'ajouter à la hauteur du bâtiment.

Dans le cas des lumiducs à diffusion ponctuelle (tubes métallique), le volume rajouté serait inexploitable, contrairement aux tubes prismatiques et tunnels de lumières qui feraient jaillir une lumière le long de leur section. Si dans ce dernier cas, les tubes sont disposés de manières successives, alors nous pourrions assister à des ambiances lumineuses traditionnellement zénithales dont il serait intéressant d'étudier l'impact sur les usagers.

Entre le plancher au-dessus et le plafond en dessous, si un tube horizontal lumineux est installé entre les deux, alors il permettrait d'éclairer simultanément les niveaux respectifs auxquels ses éléments renvoient. Le plancher serait creux (i.e. charpente métallique) et les surfaces du plancher et du plafond seraient translucides.

4.3.5 Lumiduc et murs

« un mur peut constituer un support structurel, une mesure de sécurité ou le moyen de se protéger des éléments. Il peut être un écran qui protège l'intimité ou le support d'ornements, » (Miles, 2010). C'est également une notion qui évoque la limite et la fin. Les murs sont concernés par les tubes et diffuseurs des lumiducs verticaux.

Mur support, et mur lumière : si ce type de lumiduc est utilisé pour éclairer des espaces superposés (en coupe), alors nous aurions deux cas de figures : d'un côté le mur peut être support des tubes canalisateurs passant pour diffuser leur lumière dans les niveaux inférieurs. D'un autre, une série de tubes prismatiques et de tunnels de lumière pourrait définir un mur lumineux sur toute la longueur de la coupe du bâtiment contrairement aux lumiducs métalliques et aux câbles de fibre optique.

Simulation de fenêtre traditionnelle : Si l'espace intérieur ne dispose pas d'ouvertures pour l'éclairage naturel, alors une simulation de fenêtres pourrait être possible en effectuant une diffusion latérale dans le but de reproduire l'effet naturel de la fenêtre traditionnelle. Par ailleurs, l'orientation de ce diffuseur peut être quelconque sur le mur, ce qui signifie que la perception de la lumière, l'aménagement et donc l'usage fait de l'espace changerait. Ce dernier point pourrait représenter une piste de recherche intéressante.

4.3.6 Lumiduc et hauteur du bâtiment

Tel que nous venons de le voir, un usage de lumiducs horizontaux à grande section serait en cause d'une augmentation de la hauteur du bâtiment, bien sûr si la hauteur utile (2.5m) de plafond-à-plancher reste la même. De même, l'augmentation de l'épaisseur du faux plafond ainsi que du plancher rehaussé additionnés, auraient des conséquences sur l'étanchéité/ la perméabilité « sensible » entre les niveaux intérieurs du bâtiment.

Lumiduc de petite section : il s'agit du lumiduc à fibre optique, dont la section de tube est relativement petite (gaine, câble). Cela signifierait que si un tel dispositif est installé de manière à parcourir le plancher et le plafond et offrir une diffusion lumineuse dans les deux côtés, il optimiserait au contraire l'espace dédié au passage des réseaux énergétiques.

4.3.7 Lumiduc et épaisseur bâtiment

Par épaisseur, nous entendons la distance comprise entre deux façades intérieure ou extérieure successives d'un bâtiment. Du côté des lumiducs, plus la technologie se développe plus il y aura des espaces très éloignés de la surface qu'il sera possible d'éclairer.

Bâtiment allongé : Si des lumiducs horizontaux à grande section (tunnels de lumière dont la portée atteindrait 200m selon le fabricant Sunportal) venait à être installés, alors l'espace qu'ils permettraient d'éclairer serait particulièrement étendu, continu, très épais, et sans besoin d'ouvertures. Il permettrait d'augmenter l'épaisseur du bâtiment et donc favoriser une densité et une compacité du volume intérieur. A défaut d'avoir des ouvertures, ces formes pourraient être continues (horizontalement) et s'adapter aux contraintes liées à la trames urbaine en se développant verticalement (Figure 4-9).

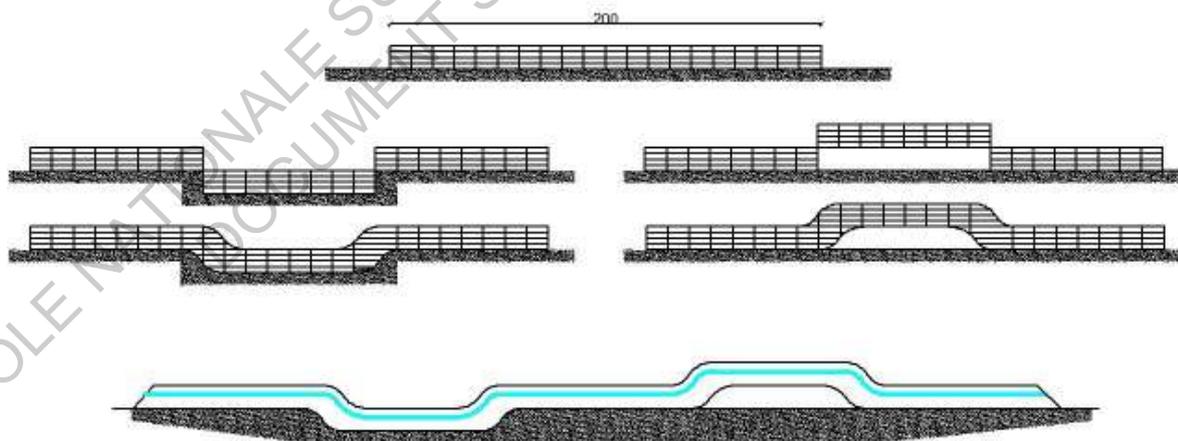


Figure 4-11 Schéma. Adaptation de la forme initiale à une contrainte réglementaire urbaine : la trame viaire.

La question qu'on se pose est celle de savoir si nous aurons des bâtiments de 200 ou 400m, au moment où ce genre de formes datant de l'époque moderne et connu sous le nom de

barre de béton a été démolie dans plusieurs occasions ? et quelle usage pour ces nouvelles formes ?. la question est beaucoup plus pointu pour pouvoir la traiter intégralement dans cette recherche, néanmoins, un des usages possibles de cette forme sera développé sous le thème de Lumiduc et déplacement urbain (Cf. 4.4.8.)

Elargissement de la base : une des formes visibles d'épaisseur de la forme du bâtiment, est la forme en pyramide vue précédemment (Figure 4-4) qui pourrait être la conséquence d'une multiplication de surfaces horizontales (toitures).

4.4 Analyse thématique urbaine

4.4.1 Lumiduc et rue

Parler de rue, c'est aborder le tissu urbain dans son intégralité. Celle-ci est le négatif, le contour, la limite, la fin de l'espace bâti et le début de l'espace vide. Elle évoque le réseau de déplacement, le passage des flux, le paysage et ses perspectives, mais aussi le parcellaire et son exploitation.

En abordant le thème de la rue, il est difficile de ne pas établir de liens avec les effets de l'usage du lumiduc sur les paramètres architecturaux que nous venons de questionner, car l'impact ressentit sur la rue en dépend directement.

Nous avons vu que si des lumiducs horizontaux étaient utilisés sur un bâtiment de grande profondeur, une augmentation de l'épaisseur serait provoquée aux niveaux des façades, ce qui voudrait dire un rapprochement entre les façades urbaines notamment lorsqu'il s'agit de tissu urbain traditionnel (ruelles, impasses).

La rue : si des lumiducs verticaux étaient utilisés pour éclairer des formes urbaines souterraines, alors la présence des capteurs aux niveaux des rues et des espaces vides de manière plus générale pourrait augmenter la section de la rue. Cela aurait pour conséquence l'addition d'une autre fonction à l'espace de la rue, celle de capturer le rayonnement solaire (en plus du déplacement, du verdissement, de l'éclairage public et du stationnement). Ces capteurs deviendraient alors une partie du réseau du mobilier urbain dédiée à l'éclairage. D'un autre point de vue, si une application d'un nombre important de capteurs est faite au niveau de la rue, alors on pourrait assister à une sophistication du paysage urbaine.

La rue aérienne : si l'usage des lumiducs horizontaux provoque un élargissement de la base de la forme des bâtiments au sol (rapport du lumiduc à la toiture), alors cela pourrait avoir une conséquence sur le niveau de la rue. Celle-ci pourrait être soit engloutie en raison de l'accolement des bâtiments tout en restant au niveau du sol (+0.00), et deviendrait donc une rue couverte (Figure 4-10), soit elle serait rehaussée pour à des niveaux supérieurs au-RDC tout en restant ouverte sur le ciel (Figure 4-11).

La rue souterraine : toujours si un usage de lumiducs horizontaux permettait d'avoir des formes de bâtiments en pyramides, alors leur imbrication les unes sur les autres pourrait mener à l'établissement d'une liaison entre eux au niveau du sous-sol. La rue souterraine deviendrait l'élément de liaison (Figure 4-12).

Rue verticale : dans ce sens la ville se développerait automatiquement en coupe, ce qui veut dire que le déplacement s'effectuera d'avantage dans le sens de la verticalité. La rue verticale représentée par l'accessoir, l'escalator, les escaliers ou les pentes deviendrait le nouveau critère de fluidité et d'efficacité en termes de mobilité urbaine.

Accessibilité lumineuse et microclimat : l'accessibilité de l'éclairage naturel dans la rue dépend de son gabarit (Patriarche, 2014). En effet, si les lumiducs sont utilisés pour éclairer une rue, c'est bien au niveau des trottoirs qu'ils pourraient être les plus efficaces. Si le lumiduc vertical est utilisé dans ce cas-là, alors un compromis entre l'accessibilité de la lumière naturelle et le microclimat à l'intérieur de la rue serait réalisé, diminuant le recours à l'énergie électrique pour réguler le microclimat intérieur, spécialement les rues dont le gabarit est relativement réduit. D'autant plus, la densité du volume construit augmenterait (Figure 4-13).

Une autre question reste celle de la perception de la lumière naturelle qui proviendrait de l'intérieur du volume bâti.



Figures 4-12 Coupe. Le maintien du niveau de la rue à son niveau initial fait qu'elle devienne couverte.

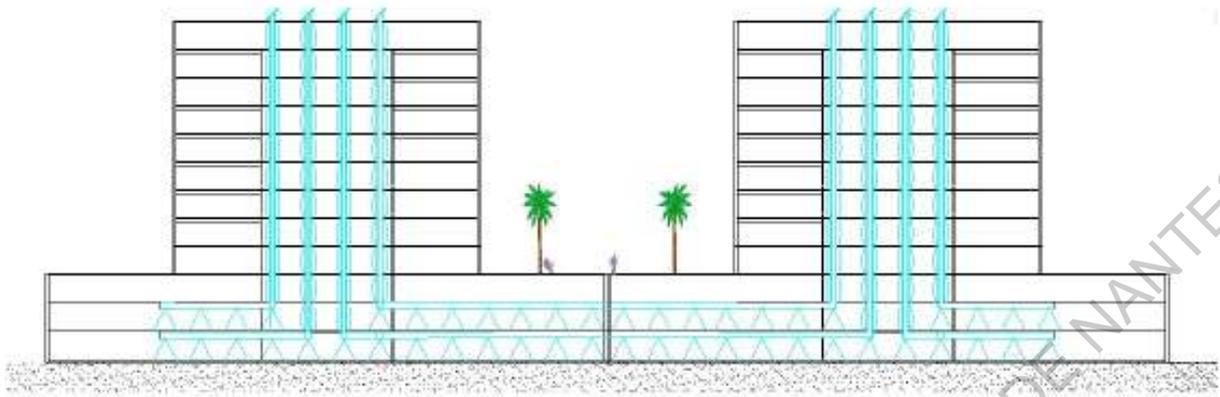


Figure 4-13 Coupe. Le rehaussement du niveau de la rue

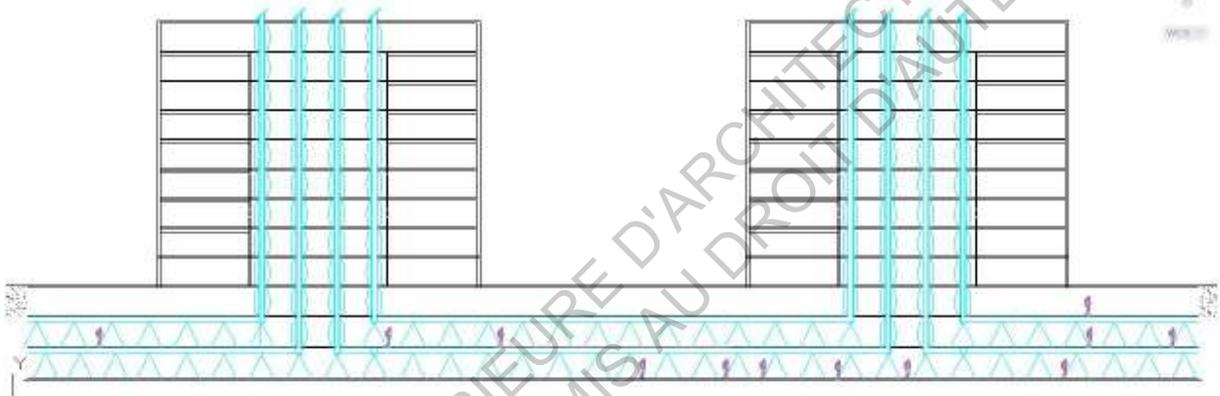


Figure 4-14 Coupe. Rue souterraine.

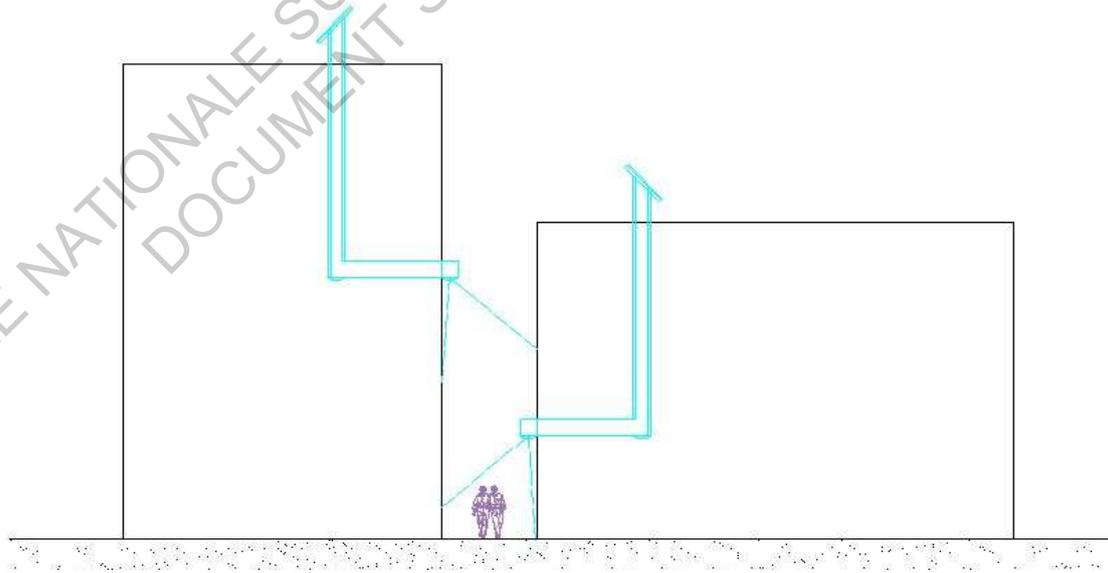


Figure 4-15 . Coupe. accessibilité de la lumière naturelle dans les petits gabarits de rues. La lumière naturelle est en provenance de la forme bâtie.

4.4.2 Lumiduc et paysage urbain

Le paysage urbain dépend du point de vue où l'on se trouve. Nous distinguons deux types d'appréhension, un regard sur l'ensemble de la ville qui serait global et un regard architectural depuis la rue (Panerai, 1999).

Le paysage de la ville est appréhendé depuis l'intérieur en la parcourant (Idem). Si un tissu urbain reposait principalement sur les lumiducs pour éclairer ses zones profondes, nous pourrions assister à un tissu dont les parcours ne seraient pas manifestes, appréhendés d'un point de vue global, en raison de la compacité des formes architecturales qui seraient accolées les unes aux autres. Nous sous-entendons parallèlement que la ville serait parsemée de passages couverts, de rues publiques intérieures et d'espaces creux qui déboucheraient les uns sur les autres.

Perçu depuis l'échelle architecturale, les espaces intérieurs n'auraient quasiment pas de vues sur le ciel. La solution serait de fabriquer ces vues en toute pièce grâce à la technologie de pointe des vidéos à haute résolution. On pourrait imaginer des scènes zénithales correspondant aux climats extérieurs ou encore des rues parcourues d'ambiances inspirées des quatre saisons. L'effet trompe l'œil prendrait tout son élan, l'utilisateur devient l'acteur d'une paysage quotidien très sophistiqué, digne des studios de grandes productions cinématographiques.

Dans le cas où des lumiducs verticaux sont installés pour avoir un éclairage en relais, soit ponctuels ou linéaires, plus la toiture se rapprocherait du sol (hauteur du bâtiment diminue) plus les capteurs les capteurs définiraient une nouvelle image de l'espace urbain, ainsi qu'un nouveau rapport à l'usage de l'espace public.

4.4.3 Lumiduc et silhouette urbaine

L'image des villes est souvent donnée par la silhouette des formes verticales. Ce qui a attiré notre attention dans ce type d'images, est la présence d'éléments extérieurs aux bâtiments et aux structures bâties, principalement les antennes de télécommunications. Si des lumiducs seraient utilisés en masse, nous pouvons dans le même cas de figure, assister à une silhouette dessinée par les capteurs de lumiducs sur les sommets des bâtiments, orientés vers le ciel comme un symbole de contrôle, à la fois d'une porosité, d'une irrigation permanente de rayonnement solaire, et surtout d'une profondeur et d'une densité importante du dessous urbain.

Si nous admettons que les formes des bâtiments ont des distances de plus en plus rapprochées voire colées en raison de l'usage des lumiducs, les rues seraient très peu importantes de gabarits, et cela nous projetteraient la silhouette telle que représentait dans la figure 3-14. Si le lumiduc permettrait d'avoir une ambiance à des distance sous terraines importantes, alors la ville développera un enracinement profond de ces bâtiments d'une

part, et leur élancement peut être dans ce cas-là moins importants. Une variation importante dans les hauteurs des bâtiments serait alors visibles (Figure 3-14).



Figure 4-16 Dessin. Silhouette urbaine, composé de l'addition des formes résultant de notre analyse.

4.4.4 Lumiduc et intériorité

Les espaces profonds qu'il s'agit d'éclairer sont principalement sans ouvertures sur l'extérieur, pouvant être privés ou publics, et dont le caractère présente une introversion. Ces lieux sans orientations sont des lieux abstraits qui -comme le définit Devilliers- évoquent l'énigme (Devilliers et al, 1982)- sont des lieux où le lumiduc vient apporter une lumière homogène, contrôlée et surtout naturelle et indicatrice de temporalité. Le lumiduc favorise pour ainsi dire l'intériorité de l'espace urbain à partir du moment où des espaces extérieurs abritant traditionnellement des usages de plein air sont systématiquement renfermés dans un dedans permanent. Ce même caractère d'intériorité est visible dans des formes d'espace tel que la cour intérieure ou l'atrium, à la différence que ces derniers sont visuellement et thermiquement poreux (Plassart, 2015).

S'en tenant à l'ambiance lumineuse, ces dernières formes (Atrium) ont la faculté de procurer une lumière naturelle à des espaces profonds grâce à leurs larges ouvertures. Si on venait à installer des lumiducs au-dessus de ces espaces, on pourrait assister à la création de poches intérieures vides qui reprendraient la même forme physique, et la même ambiance lumineuse mais qui aurait d'autres facultés thermiques, la forme serait un sorte d'atrium artificialisé, dont les ambiances extérieures lui sont transmises de façon différée. Est-ce à une forme développée de l'atrium et de la cour intérieure que nous sommes entrain d'assister ? Et est-ce que l'usage du lumiduc n'est-il pas une voie de mutation de ce type de formes dans un contexte urbain dense ? L'exemple du cabinet d'avocat à Washington, où le lumiduc à parois prismatiques a pris place dans le vide intérieur d'un puits de lumière, et a permis un apport beaucoup plus important de lumière au niveau inférieur comme le montrent les figures 4-17.



Figures 4-17 Photographie. Lumiduc prismatique. James Carpenter. Washington DC. USA
(carpenterlowings.com/portfolio_page/solar-light-pipe/)

4.4.5 Lumiduc compacité et porosité

Si des lumiducs sont disposés en relais horizontalement, cela provoquerait une augmentation du volume d'espace éclairé derrière la zone passive. Nous nous retrouverions alors avec un taux de compacité particulièrement élevé, c'est-à-dire un ratio élevé du volume d'espace sur l'enveloppe.

Par ailleurs, parler de porosité, c'est d'une part évoquer la connectivité et la perméabilité des flux énergétiques et des ambiances extérieures (Secchi et Vigano, 2008) . Elle s'exprime d'un côté à travers l'enveloppe et ses ouvertures extérieures, et d'un autre dans les vides créés à l'intérieur. Nous savons que pour éclairer un espace, 15% de sa surface doit être ouverte dans le mur de la façade (Reitek et Deherde, 2003). S'il y a une présence importante d'espaces profonds, alors deux échelles pourraient être distinguées :

Echelle architecturale : la porosité se verrait augmenter grâce aux étendues des tubes canaliseurs de l'ambiance lumineuses. La porosité deviendrait plus exprimé au niveau de la façade, c'est-à-dire que les capteurs et les ouvertures traditionnelles partageront une nouvelle apparence urbaine.

Echelle urbaine : les conséquences d'un usage intensif de lumiduc dans un contexte urbain dense, permettrait à ce dernier d'avoir plus de flexibilité dans les volumes. Cette flexibilité pourrait être exploitée dans le dégagement des surfaces du sol et optimiserait ainsi une porosité urbaine, favorable à l'évolution du vide urbain et du réseau viaire.

4.4.6 Lumiduc et climat

Un espace fermé permet de réduire voire d'éliminer les échanges thermiques entre les deux côtés de la paroi. Ainsi, si un éclairage se fait avec un lumiduc, alors la fermeture de cet espace aurait pour conséquence la régulation des échanges thermiques et le maintien d'un microclimat intérieur sous contrôle.

Ce contrôle qu'il est possible d'avoir grâce aux gaines d'aération déjà existantes, n'attendait apparemment qu'un système d'éclairage naturel pour être complété et transporter les effets de la nature à des distances importantes depuis l'extérieur.

Dans les hautes latitudes, le soleil est un luxe (Boubekri, 2008), dans les plus basses, il représente un paramètre majeur dans la réalisation d'un confort thermique intérieur. Si l'usage du lumiduc est optimisé et incorporé dans la réflexion de base, alors pourrait s'imposer comme un marqueur très important de la durabilité, notamment dans les régions à climats chauds, on parle alors de découplage lumière-chaleur.

4.4.7 Lumiduc et végétation

Si la vie humaine a besoin de plus de choses que de la lumière naturelle pour réaliser son confort, qu'en est-il de la végétation qui ne dépend que de cette ressource pour survivre et se développer ?

Petit jardin et potager, ou grandes exploitations agricoles et aquacoles, le lumiduc pourrait changer notre manière d'implanter le végétal en milieu urbain. Mori, l'inventeur de Himawari le fabricant japonais de lumiduc à fibres optiques, avait imaginé en 1978 des champs sous-marins d'exploitation aquacoles, déclarant que c'était un des principaux leitmotifs qui l'ont poussé à réaliser cette innovation (The What's New Magazine, 1988).

Par intérêt à la production massive de produits aquacoles mais aussi agricoles, nous pourrions dans ce cas fournir des terres de production agricoles dans des milieux peu communs. Nous pourrions imaginer par extension à l'idée de Mori, des plateformes superposées verticalement sur les berges des villes, voire des plateformes Offshore de production agricole qui auraient pour intérêt le ravitaillement de zones éloignées des continents, ce qu'on pourrait appeler des poches agricoles, des sortes d'oasis pour les territoires dont la capacité de production sur la surface terrestre est limitée.

Côté jardin urbain, après les toits terrasses et les murs végétalisés, nous assistons depuis 2012 grâce aux lumiducs, au premier jardin sous-terrain du monde. En effet, dans une ville comme New York, développer la ville en coupe est une tradition assez ancienne.

Si il y a un manque d'espace sur le sol, le végétal pourrait prendre place dans des friches souterraines, voir dans des espaces intérieurs enfermés. Dans ce cas, si on se servait des lumiducs, alors ils permettraient à ces espaces végétalisés de se proliférer horizontalement

et verticalement, et réaliserait une stratification fonctionnelle et spatiale des ambiances urbaines. La Figure 4-18 représente une affiche de promotion du Park new yorkais du LOWLINE (3.5.2.) et résume l'idée de la stratification verticale des milieux (minéral, végétal), des usages (habitat, déplacement, travail et loisir) et des ambiances dans la ville.



Figure 4-18 Photo. Affiche de promotion. LowLine, NY (Source : Page FB. lowline)

4.4.8 Lumiduc et déplacement urbain

Selon notre analyse, nous avons pu voir que le réseau de déplacement sous terrain a évolué selon un besoin, celui de mettre les usages encombrants sous terre. Aujourd'hui à travers les réseaux de métros, nous pouvons voir à quoi ressemble une forme souterraine dans une ville contemporaine et à quoi ces espaces peuvent également servir.

le lumiduc est dispositif d'éclairage naturel rattaché à l'espace profond qu'il soit en surface ou en sous-sol. Comme nous venons de le voir à travers les précédentes analyses, si le lumiduc est utilisé comme source d'éclairage essentielle, et qu'il est d'une performance évolué, alors une transformation radicale pouvait survenir sur l'ensemble de la forme architecturale et urbaine, influençant l'évolution la trame de base du réseau de déplacement urbain.

.La mobilité urbaine d'un territoire est définie selon la technologie et le réseau de transport dont il dispose. Plus ça va vite, plus ça va loin. La vitesse apportée par la voiture est l'une des raisons de l'étalement urbain.

Une mobilité mixte : la rue transformée par l'usage du lumiduc, aurait pour conséquences la diversification de ses formes (aérienne, couverte et souterraine et étendue) ainsi que leurs usages. Le réseau de déplacement prendrait appui sur ce nouveau paramètre de la rue en évoluant dans les deux sens vertical et horizontal. De plus la stratification des ambiances lumineuses, aurait pour conséquence l'évolution de parcours urbains.

Une hiérarchisation de flux : nous avons vu que plus le gabarit d'une rue est petit, plus le lumiduc participait à la réalisation d'un compromis entre accès à la lumière naturelle et au microclimat urbain. Si tel est le cas, nous assisterions à un tissu dense, composé de rues de petits gabarits (en surface) favorables à l'évolution d'un transport doux (piéton, cycliste) à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Par ailleurs, si les formes souterraines reposaient sur les lumiducs alors ces espaces seraient une opportunité pour déplacer les usages polluants liés à la mobilité urbaine à ce niveau. Une opportunité pour développer la ville sans voiture, l'éclairage naturel disponible en surface serait également disponible en sous-sol. De plus, une compacité trop importante de la forme urbaine, empêcherait la voiture d'accéder aux cœurs des tissus denses éclairés par des lumiducs.

4.4.9 Lumiduc et soleil durable

Comment le soleil doit-il être durable ? sa durabilité, c'est l'assurance de son accès permanent dans chaque espace urbain intérieur et extérieur où il est indispensable. Avoir un droit au soleil est une revendication légitime autant que la revendication du droit à l'eau ou à l'air pur. Par ailleurs, tout droit voudrait dire la démocratisation des moyens permettant de l'attendre.

C'est pourquoi, il n'existe pas de durabilité globale, mais si la technologie de transport du lumiduc évolue pour couvrir une très grande échelle, alors on s'attendrait à une répartition équitable de la lumière du jour sur les habitants d'une unité de la ville (quartier, îlot, bâtiment). Si des formes urbaines denses et créatrices d'ombre sont appelées à être construites, le soleil durable voudrait dire un accès équitable à la technologie du lumiduc équivalent aux ambitions de densification du projet. Sa durabilité voudrait dire l'assurance d'un accès à un point de captage, un tube transporteur voire à un branchement de réseau d'approvisionnement en lumière naturelle permanent ainsi qu'à un diffuseur. Cela voudrait également dire d'avantages d'investissements et surtout plus de volonté à le faire.

5 Chapitre 5. Conclusion générale

Nous venons de développer dans ce mémoire le rapport de la lumière naturelle à l'espace urbain dense et son accessibilité à l'intérieur de l'espace profond, utilisant des dispositifs traditionnels et de contrôle dont les systèmes de transport : les lumiducs. Nous avons ensuite retracé l'imaginaire de la technologie de canalisation de la lumière naturelle dans l'histoire d'une part, et d'autre part à travers une relecture des principales productions scientifiques et littéraires contemporaines, pour arriver enfin au lumiduc d'aujourd'hui.

Nous avons pu voir les paramètres de définition d'un lumiduc contemporain, ainsi que ses différentes caractéristiques. L'aspect de la forme architecturale et urbaine dont l'effet est provoqué par le lumiduc fut notre contribution à ce thème de recherche. Ce choix est ressorti à l'issue de l'état de l'art qui nous a démontré un manque d'études sur l'effet du lumiduc sur la forme urbaine contemporaine.

Ainsi, nous avons conclu que l'espace profond articulé à un usage particulier prenant appui sur le lumiduc, possède une ambiance et une forme urbaine particulière qui a son impact sur l'ensemble du tissu et des fonctionnalités urbaines.

Le lumiduc permettrait d'avoir une forme urbaine compacte et évoluant en coupe, ce qui nous permet de dire qu'une stratification urbaine des ambiances lumineuses pourrait prendre forme dans le tissu urbain contemporain.

D'un autre point de vue, le lumiduc nous a apparue comme un outil d'abord, ensuite comme un élément pouvant déterminer la forme architecturale et urbaine en se plaçant comme compromis entre l'ambiance naturelle lumineuse et le microclimat intérieur. Il permettrait de réaliser une durabilité urbaine.

Nous pensons que l'usage du lumiduc dans ce cas-là devrait être une démarche préalable à la conception de la forme architecturale et urbaine. A travers sa flexibilité, le Lumiduc donne des possibilités à l'espace pour s'exprimer différemment, de changer les codes de perception, d'usage et de formes. Des formes de plus en plus amorphes, à l'image d'un contrôle de plus en plus important des formes des ambiances urbaines.

Au même moment, nous ne pourrions pas prétendre qu'il permet de régler une question majeure celle du renouvellement urbain ou du concept de ville sur la ville, mais la part qu'il ajoute à la définition d'une forme dense, durable, verticale, optimisée, et dont l'ambiance serait appréciée par le grand public, ne peut tout simplement pas être négligée. Reste à attendre que la technologie soit plus performante et plus maîtrisée pour relancer le débat sur la forme urbaine éclairée par le lumiduc.

Pour le moment, la difficulté majeure du lumiduc réside dans son incapacité à procurer un confort lumineux et visuel intérieur étant incapable de fournir une vue sur l'environnement extérieur et rattaché systématiquement à la lumière directe du soleil.

5.1 Difficultés rencontrées durant la recherche

Compte tenu du développement du lumiduc lié au flux énergétique du soleil, la quasi-totalité des publications que nous avons pu étudier est issue du domaine de la physique (même si certaines publications sortent de laboratoires d'écoles d'architectures).

Nous avons mal estimé l'étendu des techniques utilisées dans les dispositifs de transport de lumière au départ, ce qui nous a valu une période beaucoup plus longue pour effectuer l'état de l'art de tous les dispositifs existants.

La plus grande difficulté était de construire une méthodologie pour expérimenter l'impact du lumiduc sur la forme urbaine.

L'autre difficulté est qu'il n'existe pas en France d'études sur le sujet, encore moins de retours d'expériences significatifs sur l'usage des lumiducs. Les seules installations portées à notre connaissance ont un usage commercial qui concerne essentiellement les enseignes de la grande distribution.

5.2 Perspectives pour la suite de la recherche

Durant notre travail, nous avons rencontré certaines problématiques qui nous ont paru pertinentes pour la suite de la recherche. La première est celle de l'importance de lier une forme urbaine particulière provoqué par la présence du lumiduc à une ou des fonctions urbaines (i.e. une forme d'un habitat éclairé par un lumiduc n'est pas la même forme d'un immeuble de bureaux éclairé par un lumiduc... etc.). Nous estimons que toutes les formes que nous avons pu développer, ne s'adaptent pas à tous les usages.

Une deuxième question concerne la perception de la lumière naturelle provenant du plancher, du mur ou de la façade vers la rue. Celle-ci représente une piste intéressante à explorer, afin de comprendre l'évolution du rapport de la forme urbaine et architecturale au lumiduc.

Une troisième question concerne le lien qu'il pourrait y avoir entre l'ambiance lumineuse associée au lumiduc et le microclimat intérieur des formes urbaines selon la latitude. Cette recherche est particulièrement intéressante pour explorer le développement d'une démarche durable dans les pays à climat chaud.

Enfin, une autre question concerne la perception des espaces profonds aveugles éclairés avec des lumiducs et associant des images Haute Définition.

6 Annexes

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Annexe 1. Spectre lumineux du lumiduc

Comparaison entre le spectre de lumière naturelle et la lumière transmise par un lumiduc, avec une perte de portions des longueurs d'ondes supérieures à 700nm et inférieures à 400nm. En effet, il existe un revêtement sur le capteur qui absorbe les rayons UV et IR responsable de l'augmentation de la chaleur (Curt Maxey et al, 2008).

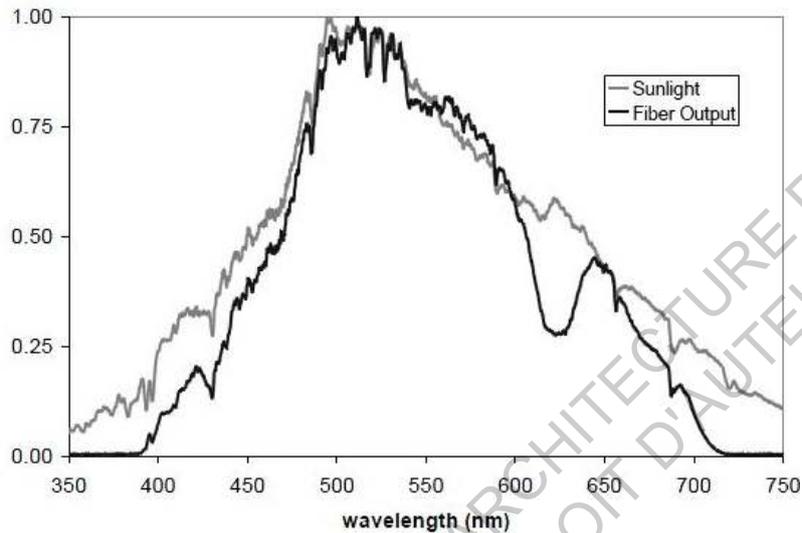


Fig. 17. Normalized comparison of direct sunlight and light from HSL fibers.

Figure 6-1 Graphe, spectre lumineux transmis du lumiduc (Curt Maxey et al, 2008)

Annexe 2. Conduit de lumière métallique

Percentage of light delivered after 20 bounces

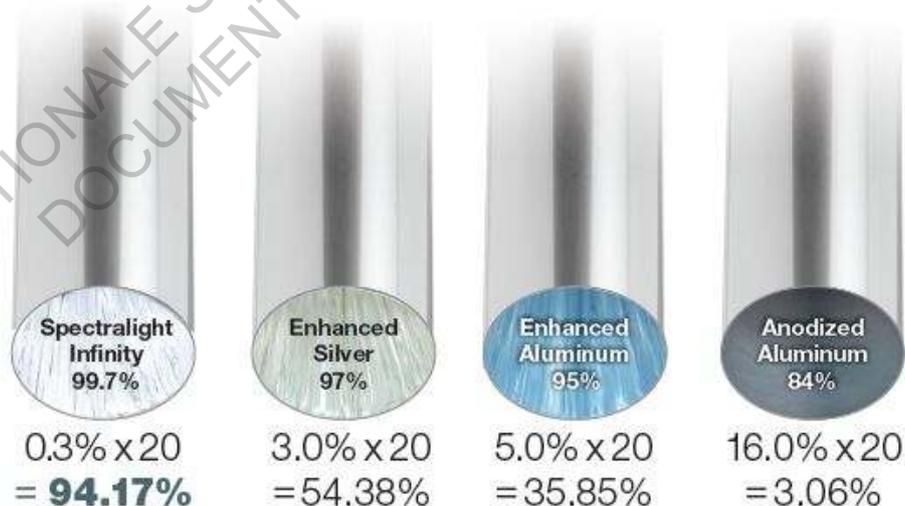


Figure 6-2 Tubes de lumiducs métalliques (Solatube.com)

Annexe 3. Lumiduc à fibre optique

Il existe deux types fondamentaux de fibres optiques : monomode et multimode. La fibre multimode est constituée de deux sous types : la fibre à saut d'indice et la fibre à gradient d'indice.

La fibre à saut d'indice : c'est le type de fibre optique le plus simple. Elle est utilisée dans les applications d'optiques courantes (dont les lumiducs). Elle est composée d'un cœur en verre, plastique ou en silice (Walker et al, 1996). D'une gaine et d'un revêtement de protection extérieur.

Un flux lumineux reste guidé dans une fibre optique à deux conditions : que celle-ci reste rectiligne et dans le cas où le rayon de courbure dépasse largement son diamètre.

Pour qu'il n'y pas est d'absorbions dans la gaine, l'indice de réfraction du cœur doit être supérieur. Une réflexion interne totale ainsi se produit tout le long du tube (Idem).

La fibre à gradient d'indice : Ce type de fibre est utilisé dans les transmissions de télécommunications. Une succession de couches de verres est placée longitudinalement à l'intérieur de la fibre. Ses verres ont des indices de réfractons différents dont chacun dépend de la distance (r) entre le centre de la fibre et la gaine (rayon du cœur de la fibre).

La fibre optique monomode : ce type de fibre est le plus utilisé en télécommunication dans les transmissions de grandes distances en raison du diamètre très petit de son cœur. En raison de sa taille, le rayon lumineux ne subit pas autant de dispersion, la transmission du rayon lumineux devient droite.

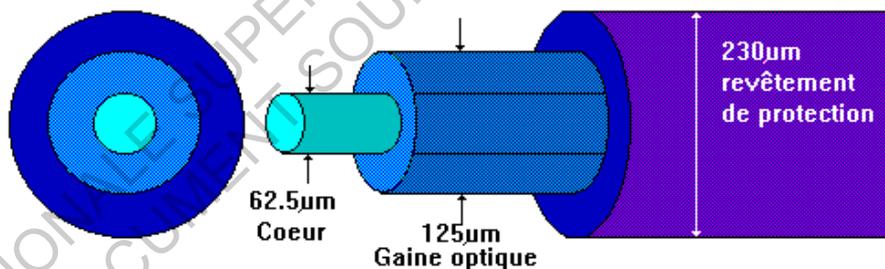


Figure 6-3 Schéma. Détail d'une fibre optique³⁶

³⁶ Michaud.chez-alice.fr

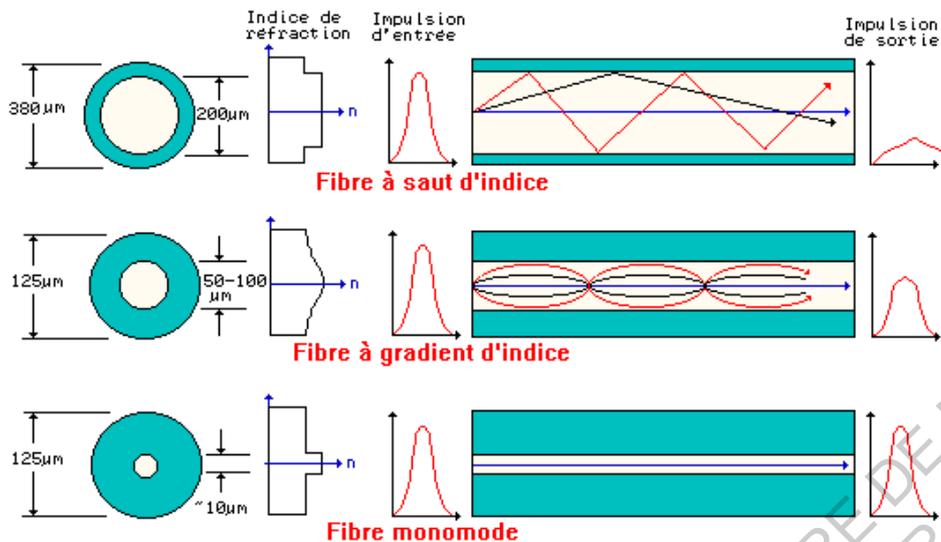


Figure 6-4 Schéma. Types de fibres optiques³⁷

Annexe 4. Transmission lumineuse du lumiduc à fibre optique

Pour qu'il y ait réflexion totale interne deux conditions sont nécessaires : la première consiste à ce que le rayon injecté soit de taille comparable au cœur, et le deuxième que l'angle d'incidence par rapport au centre de la fibre optique soit petit. Le rayon transmis dans la fibre optique doit être compris dans un cône appelé Ouverture Numérique. Les paramètres dont dépend cette ouverture sont résumés dans l'équation suivante :

$$O.N = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

où :

n_1 : l'indice de réfraction du cœur de la fibre optique

n_2 : est l'indice de réfraction de la gaine entourant la fibre optique

θ : est l'angle d'incidence compris dans l'ouverture numérique

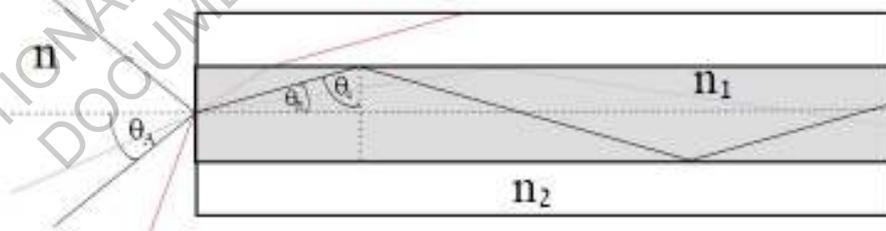


Figure 6-5 Schéma. Principe de réflexion Interne totale (Walker et al, 1996)

³⁷ Idem

OPTICAL FIBER CABLE

Cable with an excellent transmission

The cable is made of large diameter quartz glass fibers specially manufactured for Sunlight transmission.

It carries the visible rays of sunlight with little attenuation.

A single cable consists of a bundle of 6 optical fibers with a core size of 1 mm ϕ , each of which is connected to one lens, i.e. one cable transmits sunlight collected by 6 lenses.

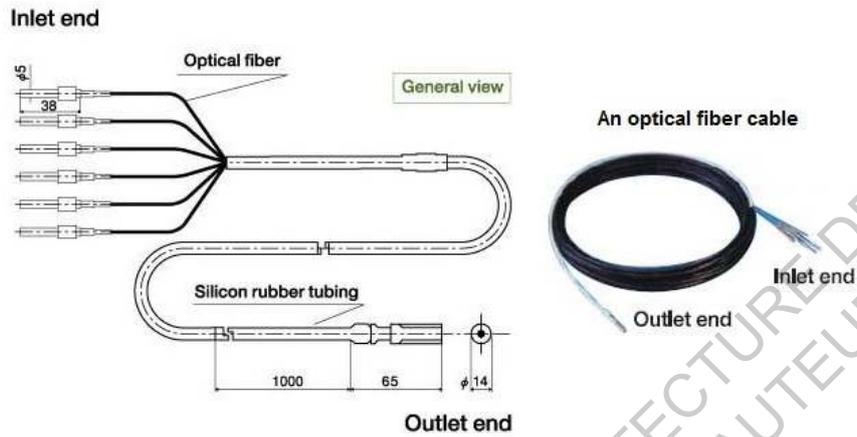


Figure 6-6 Coupe. Composantes de la fibre optique (Himawari-net.co.jp)

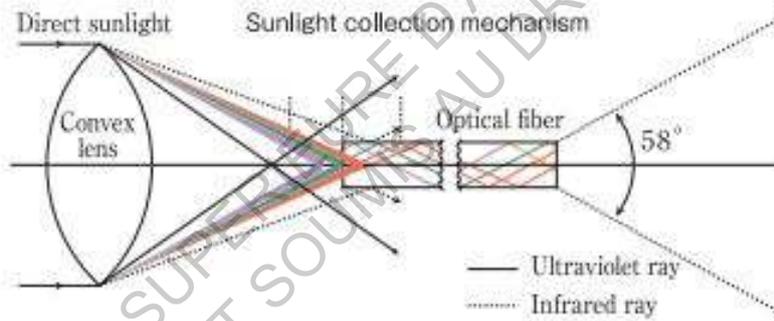


Figure 6-7 Coupe schématique. Principe de transmission du lumiduc à fibre optique (Himawari-net.co.jp)

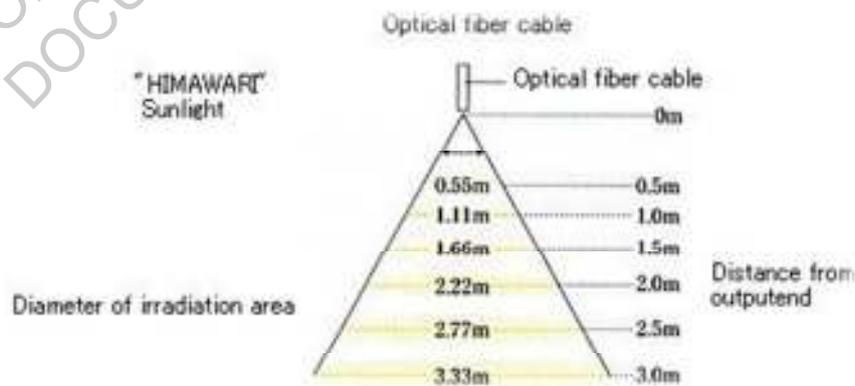


Figure 6-8 Schéma. Cone de diffusion du lumiduc à fibre optique (Himawari-net.co.jp)

Annexe 5. Tunnel de lumière :

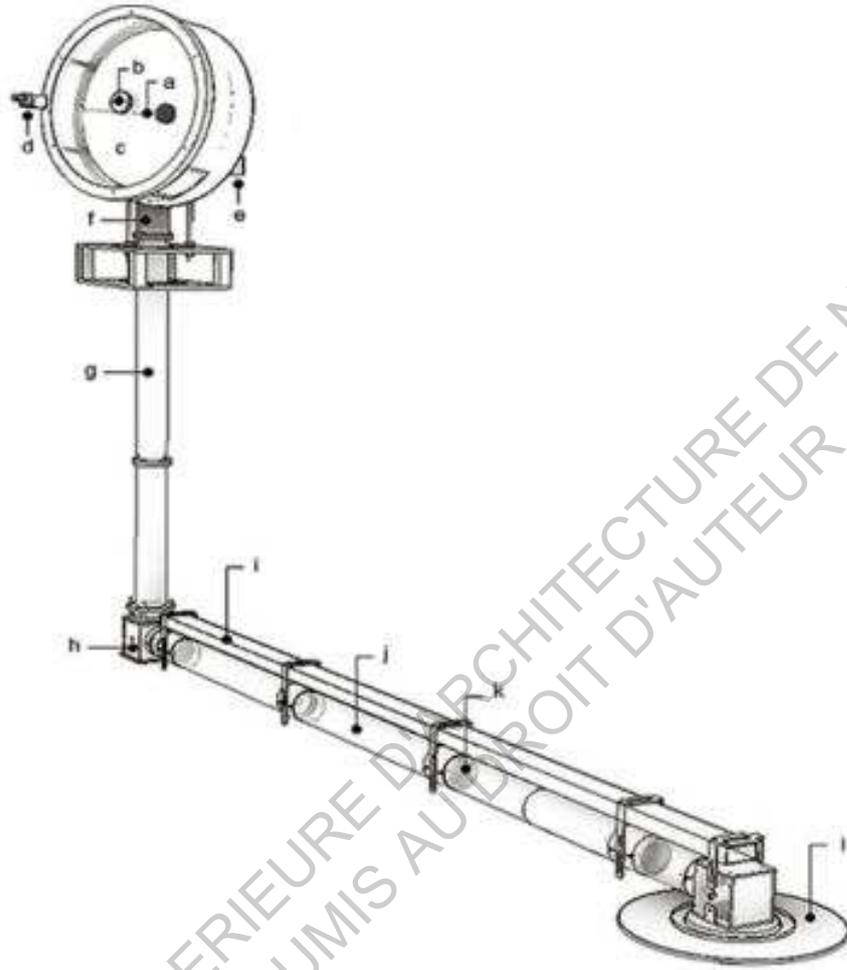


Figure 6-9 Vue axonométrique. Composantes du tunnel de lumière (thesunportal.com)

Légende :

- a. Miroir parabolique (1er)
- b. Miroir parabolique (2nd)
- c. Verre de couverture
- d. Héliostat
- e. Bras de commande
- f. Concentrateur
- g. Tube en acrylique
- h. Coude
- i. Rail de fixation
- j. Tube en acrylique
- k. Lentilles relais
- l. Diffuseur. (Source : http://thesunportal.com/eng/?page_id=98)

Annexe 6. Modèle mathématique lumiduc (conduit de lumière métallique) :

$$S - DPF_{(x,y,z)} = (a_0 + a_1 k_t + a_2 \alpha_s + a_3 k_t \alpha_s + a_4 k_t^2 \alpha_s + a_5 k_t \alpha_s^2 + a_6 k_t^2 \alpha_s^2) \rho^{(a_7 + a_8 A_p + a_9 \cot \alpha_s + a_{10} A_p \cot \alpha_s)} R^2 (H/D)^m / D^2$$

Figure 6-10 Equation de calcul de taux de DPF pour un lumiduc droit. (Zhang et al, 2001)

Où :

$a_0 - a_{10}$: sont des coefficients

k_t : indice du ciel

α_s : l'altitude du soleil

R : diamètre du tube

H : hauteur du diffuseur sur le plan de travail

D : distance d'un point quelconque depuis le diffuseur

Tant dis ce que pour un lumiduc à coudes, l'équation suivantes est donnée :

$$E - DPF_{(x,y,z)} = (a_0 + a_1 k_t + a_2 \alpha_s + a_3 k_t \alpha_s + a_4 k_t^2 \alpha_s + a_5 k_t \alpha_s^2 + a_6 k_t^2 \alpha_s^2) \rho^{(a_7 + a_8 A_p + a_9 \cot \alpha_s + a_{10} A_p \cot \alpha_s)} R^2 (1 - f_{loss})^N (H/D)^m / D^2 \quad (5)$$

Figure 6-11 Equation de calcul de taux de DPF pour un lumiduc coudé. (Zhang et al, 2001)

Où :

f_{loss} est le facteur d'absorption = 20% par coude = 0.2 (Idem)

Annexe 7. Performance du lumiduc (conduit de lumière métallique)

Dans l'étude de Zhang et al, (2001), le calcul des taux d'éclairage pour la ville de Londres appliqué de différentes longueurs de lumiducs a donné les valeurs suivantes :

Pour le 1^{er} Février :

Table 8 Light-pipe design guideline for winter for Kew, UK (Time = mid-noon, 1 February, Height of diffuser to the working plane = 2 m)

Length	Weather condition	Internal illuminance achieved at a horizontal distance of d^2 by a light-pipe of diameter ϕ , lux											
		$\phi = 210\text{mm}$			$\phi = 330\text{mm}$			$\phi = 420\text{mm}$			$\phi = 530\text{mm}$		
		$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$
600 mm	Clear ^b	35	25	15	115	80	40	200	140	70	340	240	115
	Part-overcast ^c	25	15	10	70	50	25	125	85	45	210	150	70
	Overcast ^d	15	10	5	45	35	15	80	60	30	140	100	50
1200 mm	Clear	20	15	10	75	50	25	140	100	50	260	180	90
	Part-overcast	15	10	5	45	35	15	90	60	30	160	115	55
	Overcast	10	5	5	30	20	10	60	40	20	105	75	35
1800 mm	Clear	10	10	5	50	35	15	100	70	35	200	140	65
	Part-overcast	5	5	5	30	20	10	65	45	20	125	85	40
	Overcast	5	5	5	20	15	10	40	30	15	80	60	30
2400 mm	Clear	5	5	5	30	25	10	70	50	25	150	105	50
	Part-overcast	5	5	5	20	15	10	45	30	15	95	65	35
	Overcast	5	5	5	15	10	5	30	20	10	65	45	20
3000 mm	Clear	5	5	5	20	15	10	50	35	20	115	80	40
	Part-overcast	5	5	5	15	10	5	35	25	10	70	50	25
	Overcast	5	5	5	10	5	5	20	15	10	50	35	15
3600 mm	Clear	5	5	5	15	10	5	35	25	15	90	60	30
	Part-overcast	5	5	5	10	5	5	25	15	10	55	40	20
	Overcast	5	5	5	5	5	5	15	10	5	35	25	15

Weather condition	Horizontal global illuminance	Sky clearness index, k_t
Clear ^b	41 klux	0.7
Part-overcast ^c	24 klux	0.4
Overcast ^d	12 klux	0.2

d^2 = the distance between the projection of the diffuser centre on the working plane and the point of interest.

Figure 6-12 Performance de conduits à lumière à parois métalliques (Zhang et al. 2001)

Pour le 1^{er} Avril à 10h :

Table 6 Light-pipe design guideline for spring and autumn for Kew, UK (Time = 10 am, 1 April, Height of diffuser to the working plane = 2 m)

Length	Weather condition	Internal illuminance achieved at a horizontal distance of d^2 by a light-pipe of diameter ϕ , lux											
		$\phi = 210\text{mm}$			$\phi = 330\text{mm}$			$\phi = 420\text{mm}$			$\phi = 530\text{mm}$		
		$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$
600 mm	Clear ^b	95	70	35	295	205	100	515	360	175	875	610	290
	Part-overcast ^c	55	40	20	160	110	55	280	195	95	470	330	160
	Overcast ^d	30	20	10	85	60	30	150	105	50	255	180	85
1200 mm	Clear	55	40	20	200	140	70	380	265	130	690	480	230
	Part-overcast	30	20	10	110	75	40	205	145	70	370	260	125
	Overcast	15	15	5	60	45	20	115	80	40	205	140	70
1800 mm	Clear	30	20	10	140	95	45	285	200	95	540	380	180
	Part-overcast	15	15	5	75	55	25	155	110	50	295	205	100
	Overcast	10	10	5	40	30	15	85	60	30	160	110	55
2400 mm	Clear	20	15	5	95	65	35	210	145	70	425	300	145
	Part-overcast	10	10	5	50	35	20	115	80	40	230	160	80
	Overcast	5	5	5	30	20	10	65	45	20	125	90	45
3000 mm	Clear	10	10	5	65	45	25	155	110	55	335	235	115
	Part-overcast	5	5	5	35	25	15	85	60	30	180	130	60
	Overcast	5	5	5	20	15	10	45	35	15	100	70	35
3600 mm	Clear	5	5	5	45	30	15	115	80	40	265	185	90
	Part-overcast	5	5	5	25	20	10	65	45	20	145	100	50
	Overcast	5	5	5	15	10	5	35	25	15	80	55	30

Weather condition	Horizontal global illuminance	Sky clearness index, k_t
Clear ^b	68 klux	0.7
Part-overcast ^c	39 klux	0.4
Overcast ^d	19 klux	0.2

d^2 = the distance between the projection of the diffuser centre on the working plane and the point of interest.

Figure 6-13 Performance de conduits à lumière à parois métalliques (Zhang et al. 2001)

Pour le 1er Avril à 12h :

Table 9 Light-pipe design guideline for spring and autumn for Kew, UK (Time = mid-noon, 1 April, Height of diffuser to the working plane = 2 m)

Length	Weather condition	Internal illuminance achieved at a horizontal distance of d^2 by a light-pipe of diameter ϕ , lux											
		$\phi = 210\text{mm}$			$\phi = 330\text{mm}$			$\phi = 420\text{mm}$			$\phi = 530\text{mm}$		
		$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$
600 mm	Clear ^a	115	80	40	355	245	120	620	430	205	1045	730	350
	Part-overcast ^b	65	45	25	200	140	65	345	240	115	585	410	195
	Overcast ^c	35	25	15	105	75	35	180	125	60	305	215	105
1200 mm	Clear	65	45	25	245	170	80	460	325	155	830	580	275
	Part-overcast	40	25	15	135	95	45	260	180	85	465	325	155
	Overcast	20	15	10	70	50	25	135	95	45	240	170	80
1800 mm	Clear	35	25	15	170	120	55	345	240	115	655	460	220
	Part-overcast	20	15	10	95	65	35	195	135	65	365	255	125
	Overcast	10	10	5	50	35	20	100	70	35	190	135	65
2400 mm	Clear	20	15	10	115	80	40	255	180	85	520	365	175
	Part-overcast	15	10	5	65	45	25	145	100	50	290	205	100
	Overcast	10	5	5	35	25	15	75	55	25	150	105	50
3000 mm	Clear	15	10	5	80	55	30	190	135	65	415	290	140
	Part-overcast	10	5	5	45	35	15	110	75	35	230	160	80
	Overcast	5	5	5	25	20	10	55	40	20	120	85	40
3600 mm	Clear	10	5	5	55	40	20	145	100	50	325	230	110
	Part-overcast	5	5	5	30	25	10	80	55	30	185	130	60
	Overcast	5	5	5	20	15	5	45	30	15	95	70	35

Weather condition	Horizontal global illuminance	Sky clearness index, k_t
Clear ^a	76 klux	0.7
Part-overcast ^b	44 klux	0.4
Overcast ^c	22 klux	0.2

d^2 = the distance between the projection of the diffuser centre on the working plane and the point of interest.

Figure 6-14 Performance de conduits à lumière à parois métalliques (Zhang et al. 2001)

Pour 1^{er} juillet à 12h :

Table 7 Light-pipe design guideline for mid-summer for Kew, UK (Time = mid-noon, 1 July, Height of diffuser to the working plane = 2 m)

Length	Weather condition	Internal illuminance achieved at a horizontal distance of d^2 by a light-pipe of diameter ϕ , lux											
		$\phi = 210\text{mm}$			$\phi = 330\text{mm}$			$\phi = 420\text{mm}$			$\phi = 530\text{mm}$		
		$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$	$d = 0\text{m}$	$d = 1\text{m}$	$d = 2\text{m}$
600 mm	Clear ^a	160	110	55	475	330	160	830	580	275	1395	975	465
	Part-overcast ^b	110	75	40	330	230	110	570	400	190	965	675	320
	Overcast ^c	55	40	20	160	110	55	275	195	95	465	325	155
1200 mm	Clear	90	65	30	335	235	110	625	440	210	1120	780	375
	Part-overcast	65	45	20	230	160	80	435	305	145	775	540	260
	Overcast	30	25	10	110	80	40	210	145	70	375	260	125
1800 mm	Clear	55	40	20	235	165	80	475	330	160	895	625	300
	Part-overcast	35	25	15	160	115	55	330	230	110	620	435	205
	Overcast	20	15	10	80	55	30	160	110	55	300	210	100
2400 mm	Clear	30	20	10	165	115	55	360	250	120	720	505	240
	Part-overcast	20	15	10	115	80	40	250	175	85	495	350	165
	Overcast	10	10	5	55	40	20	120	85	40	240	170	80
3000 mm	Clear	20	15	10	115	80	40	270	190	90	575	405	195
	Part-overcast	15	10	5	80	55	30	190	130	65	400	280	135
	Overcast	10	5	5	40	30	15	90	65	30	195	135	65
3600 mm	Clear	10	10	5	80	60	30	205	145	70	465	325	155
	Part-overcast	10	5	5	55	40	20	145	100	50	320	225	110
	Overcast	5	5	5	30	20	10	70	50	25	155	110	55

Weather condition	Horizontal global illuminance	Sky clearness index, k_t
Clear ^a	94 klux	0.7
Part-overcast ^b	55 klux	0.4
Overcast ^c	27 klux	0.2

d^2 = the distance between the projection of the diffuser centre on the working plane and the point of interest.

Figure 6-15 Performance de conduits à lumière à parois métalliques (Zhang et al. 2001)

Annexe 8. Performances des lumiducs selon les fabricants

Lightway

Référence	Diamètre	Été temps clair	Été temps couvert	Hiver temps clair	Hiver temps couvert	Surface éclairée
Lightway Crystal 200 HP	150 mm	290 lux	200 lux	140 lux	80 lux	6 m ²
Lightway Crystal 300 HP	220 mm	440 lux	320 lux	190 lux	120 lux	9 m ²
Lightway Crystal 400 HP	320 mm	700 lux	450 lux	250 lux	180 lux	13 m ²
Lightway Silver 600 HP	520 mm	1100 lux	830 lux	410 lux	280 lux	27 m ²
Lightway Silver 800 HP	760 mm	2900 lux	1500 lux	820 lux	400 lux	40 m ²

Figure 6-16 Performance des conduits de lumière métalliques (lightway.com)

Solatube

Light Output of Various Tubing Materials

Tubing Material	Specular Reflectivity	Light Efficiency for 10' Tube Length	Light Efficiency for 20' Tube Length	Light Efficiency for 30' Tube Length	Light Efficiency for 40' Tube Length
Spectralight [®] Infinity	99.7%	97%	94%	92%	89%
Enhanced Silver	97%	74%	54%	41%	31%
Enhanced Aluminum	95%	60%	36%	23%	14%
Corrugated/Flexible	84%	18%	3%	1%	0.1%
Approx. Number of Bounces based on Tube Length		10	20	29	38

Figure 6-17 Performance des conduits de lumière métalliques (solatube.com)

Monodraught

SUNPIPE Sizes and Maximum Light Output

on a typical flat roof application measured approximately 1.5m below SUNPIPE diffuser

Diameter (mm)	Full Summer Sun 75klux	Overcast Summer 50klux	Overcast Winter 25klux	Area Lit (to a normal daylight level)
	Lux Value	Lux Value	Lux Value	
230	337	225	112	7.5 sq.m (approx 80sq.ft)
300	607	404	202	14 sq.m (approx 150sq.ft)
450	1452	968	484	22 sq.m (approx 230sq.ft)
530	2052	1386	684	30 sq.m (approx 430sq.ft)
750	4238	2825	1413	50 sq.m (approx 530sq.ft)
1000	7675	5117	2558	60 sq.m (approx 650sq.ft)

Figure 6-18 Performance des conduits de lumière métalliques (monodraught.com)

ECHY

Nombre de modules	ECHYhome		4 modules		10 modules	
	2015	2017	2015	2017	2015	2017
Version du produit	2015	2017	2015	2017	2015	2017
Flux lumineux à 10m*	6700lm	8000lm	26800lm	32100lm	67000lm	80400lm
Flux lumineux à 20m*	5200lm	6200lm	20800lm	24900lm	52000lm	62400lm
Surface éclairée à 100 lux à 10m	45m ²	55m ²	185m ²	220m ²	470m ²	560m ²
Surface éclairée à 250 lux à 20m	13m ²	16m ²	55m ²	65m ²	145m ²	170m ²
Dimensions	150x65cm		380x125cm		380x300cm	
Poids	70kg		250kg		500kg	
Hauteur du mât	0,5m		1,1m		1,9m	

* Pour un ensoleillement direct de 100.000 lux.

Figure 6-19 Performance des conduits de lumière métalliques (ECHY.fr)

Himawari

Optical fiber output data (in case 98,000 lux sunshine)				
Distance (m)	Average Illuminance	Illuminance (center)	Illuminant diameter (m)	Illuminant area (m ²)
0.5	7,967	11,154	0.554	0.241
1.0	1,990	2,786	1.109	0.966
1.5	884	1,238	1.663	2.172
2.0	497	696	2.217	3.860
2.5	318	445	2.772	6.035
3.0	221	309	3.326	8.688

Fiber core size	1.0mm
Number of cores	6 cores
Fiber length	15 m
Luminous flux per cable	1,920 lumen ※
Illuminant angle	58°

※ The unit of light intensity (luminous flux) is called Lumen
1 lumen represents the quantity of light needed to illuminate
1 m² at a brightness of 1 lux.

Figure 6-20 Performance des conduits de lumière métalliques (Himawari-net.co.jp)

Annexe 8. Fabricants de lumiducs

1. 1. Les conduits de lumières à tubes métalliques :

Fabricant	Solatube, Monondraught, Velux, Lightway
Mode de captage	Passif ou actif
Mode de canalisation	Réflexion spéculaire
Mode de diffusion	Ponctuel
Type de tube	Métallique
Section du tube	Large

Figure 6-21 Caractéristiques des conduits de lumière à tubes métalliques



Figure 6-22 Photo. Conduit de lumière métallique (Solatube.com)



Figure 6-23 Photographie. Tube et diffuseur d'un conduit de lumière métallique (Solatube.com)

1.2. Les conduits de lumière à tubes prismatiques :

Fabricant	Héliobus
Mode de captage	Actif
Mode de canalisation	Réflexion spéculaire et réflexion interne totale
Mode de diffusion	Linéaire
Type de tube	Prismatique
Section du tube	Large

Tableau 6-24 Caractéristiques des conduits de lumière à tubes prismatique : Héliobus



Figure 6-25 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Héliobus (Heliobus.com)



Figure 6-26 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Héliobus (Heliobus.com)

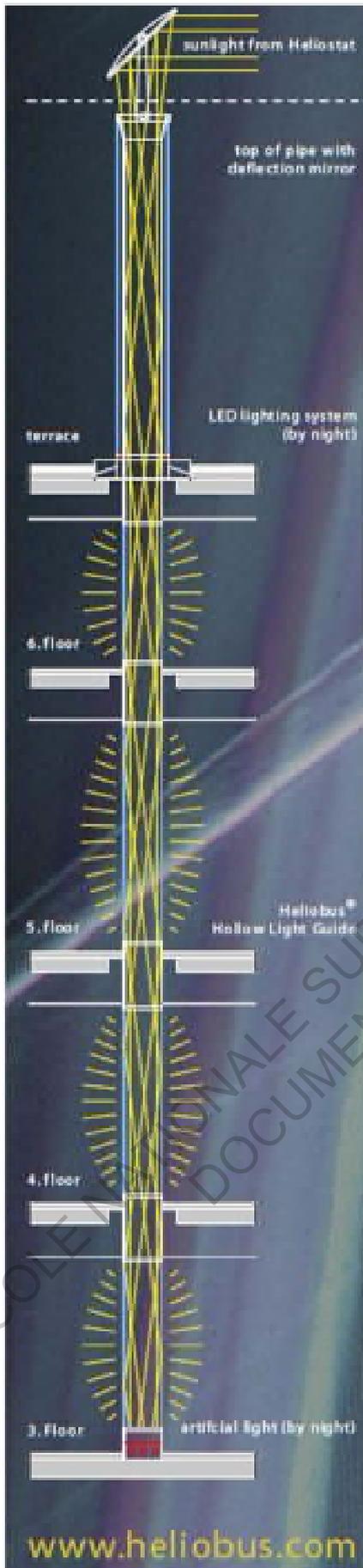


Figure 6-27 Schéma. Conduit de lumière prismatique. Héliobus (Héliobus.com)



Figure 6-28 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Aspect Paysager. Héliobus (Heliobus.com)

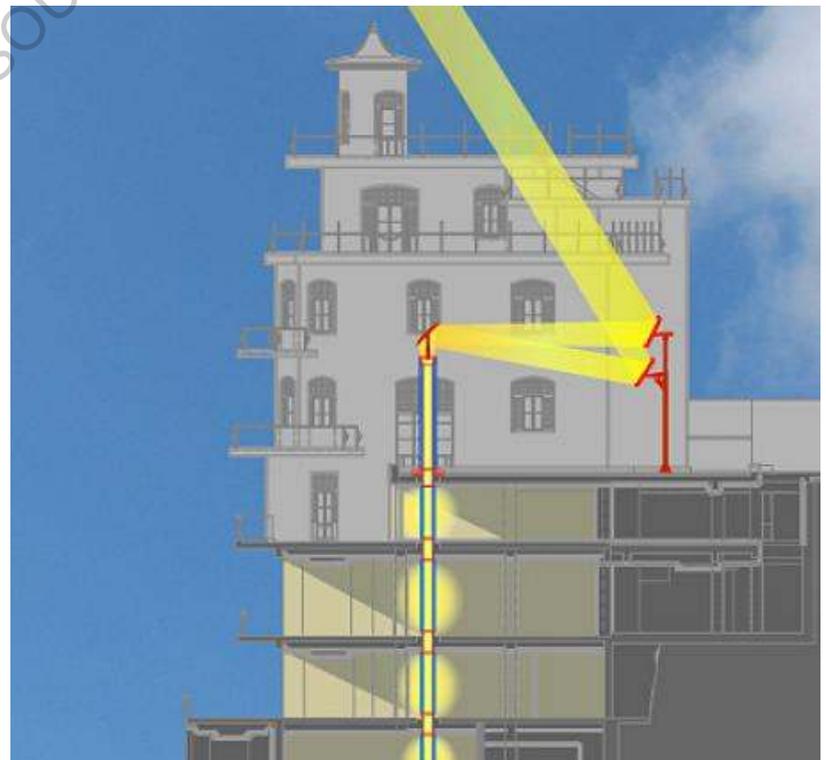


Figure 6-29 Photographie. Tube-diffuseur de conduit de lumière prismatique (Heliobus.com)



Figure 6-30 Schéma. Photographie. Tube-diffuseur de conduit de lumière prismatique (Heliobus.com)

Fabricant	SolarCanopy, Suncentral
Mode de captage	Actif
Mode de canalisation	Réflexion spéculaire et réflexion interne totale
Mode de diffusion	Linéaire
Type de tube	Prismatique
Section du tube	Large

Tableau 6.1 Caractéristiques des conduits de lumière à tubes prismatique : Solarcanopy et suncentral



Figure 6-31 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Solarcanopy (Rosemann et al, 2007)



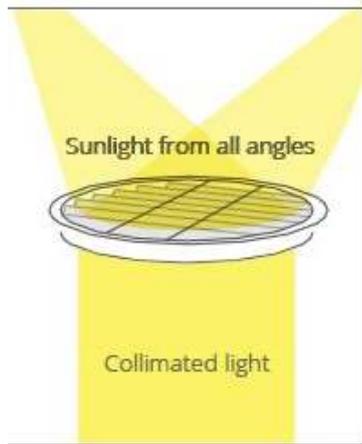
Figure 6-32 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Suncentrale (ecobuildingpulse.com)



Figure 6-33 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Suncentrale (www.ecobuildingpulse.com)



Figure 6-34 Photographie. Capteur collimateur. Suncentral (Suncentral.com)



SunBeamer™

The SunBeamer™ tracks the sun autonomously, projecting a stationary collimated beam of sunlight along any side of the building, including the north side, or through an atrium or lightwell.

Figure 6-35 Dessin. Capteur Suncentral (Suncentral.com)

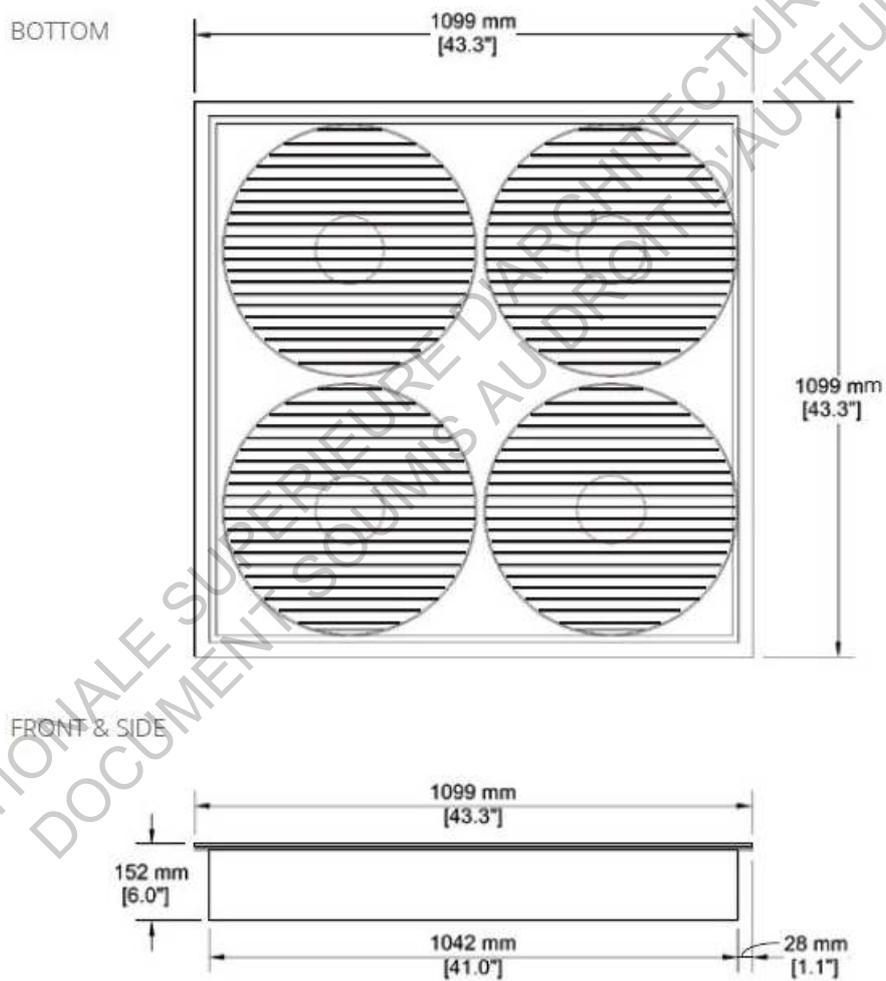


Figure 6-36 Plan. Dimensionnement du capteur Suncentral (Suncentral.com)

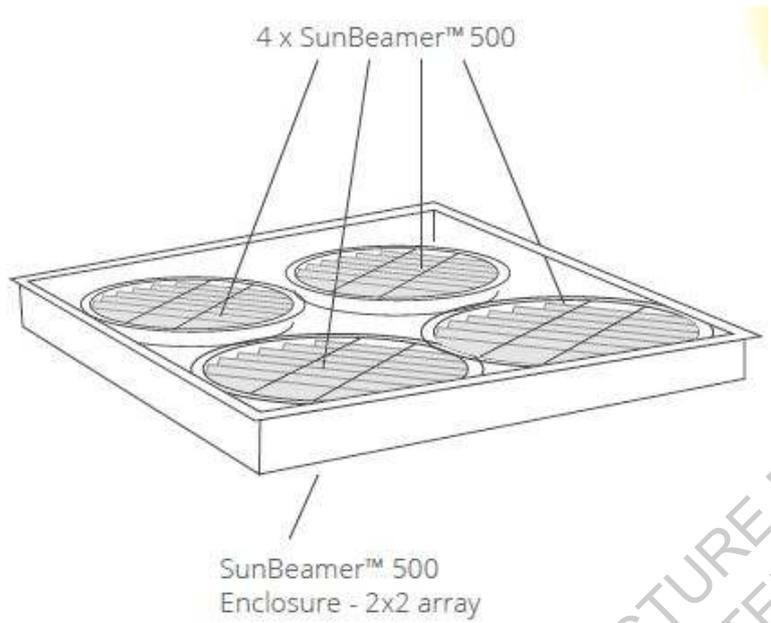


Figure 6-37 Dessin. vue axonométrique capteur Suncentral (suncentral.com)

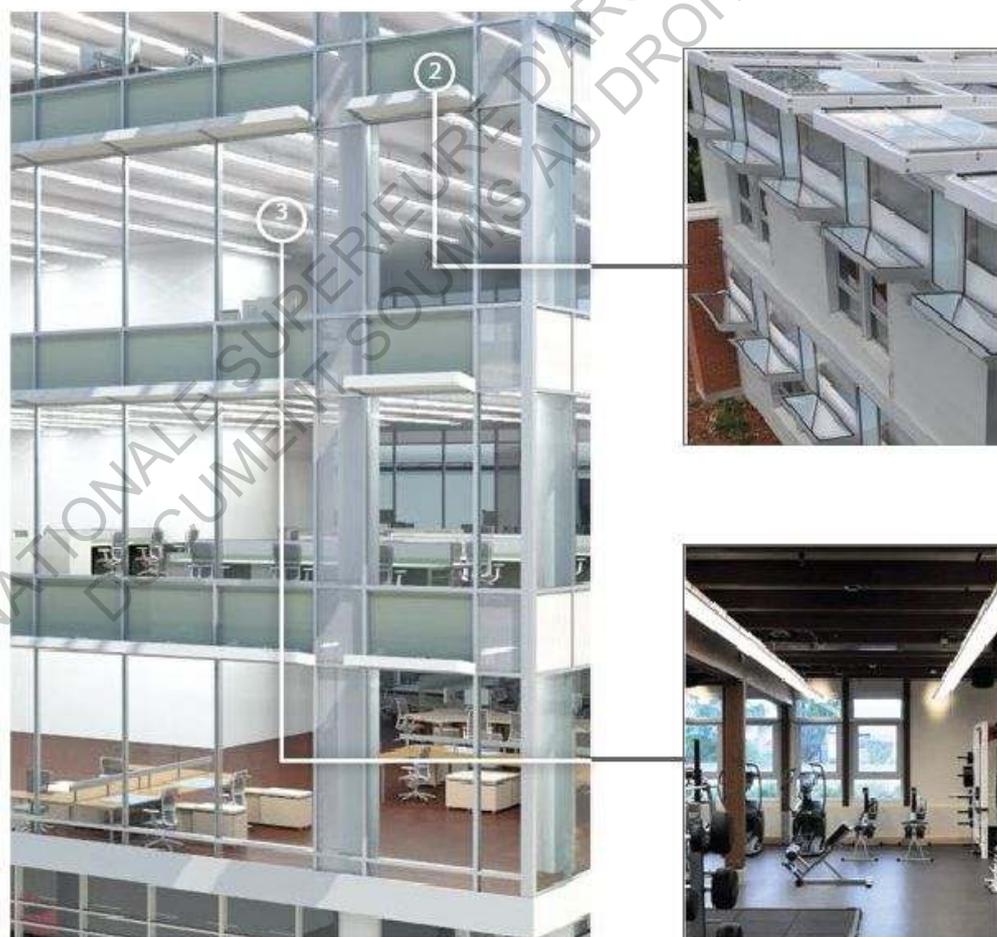
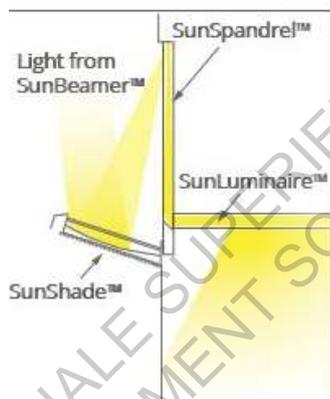


Figure 6-38 Photographie. Diffuseur Suncentral (Suncentral.com)

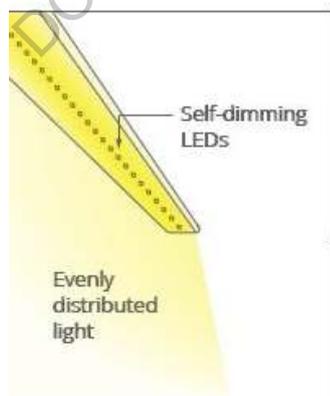


Figure 6-39 Photographie. Tube-diffuseur de conduit de lumière prismatique. Solarcanopy (Rosemann et al, 2007)



SunShade™ and SunSpandrel™

Light from the SunBeamer™ is intercepted by optics integrated within the SunShade™, positioned on every floor of the building. Sunlight is concentrated and directed into the SunSpandrel™, then channeled into the SunLuminaire™.



SunLuminaire™

The SunLuminaire™ is a hybrid light fixture that transports full-spectrum sunlight from the SunSpandrel™ up to 50 feet within the building. It features LED lighting and photosensors that automatically dim the electric lighting when sunlight is present.

Figure 6-40 Dessin. Luminaire prismatique. Suncentral (suncentral.com)

Fabricant	Sundolier
Mode de captage	Actif
Mode de canalisation	Réflexion spéculaire et réflexion interne totale
Mode de diffusion	Linéaire
Type de tube	Prismatique et/ ou métallique
Section du tube	Large

Tableau 6-41 Caractéristiques des conduits de lumière : Sundolier



Figure 6-42 Photographie. Capteur de conduit de lumière. Sundolier (Sundolier.com)



Figure 6-43 Photographie. Diffuseur conduit à tube métallique. Sundolier (Sundolier.com)



Figure 6-44 Photographie. Diffuseur conduit à tube prismatique. Sundolier (Sundolier.com)



Figure 6-45 Dessins. Dimensions diffuseur à lentille. Sundolier (Sundolier.com)

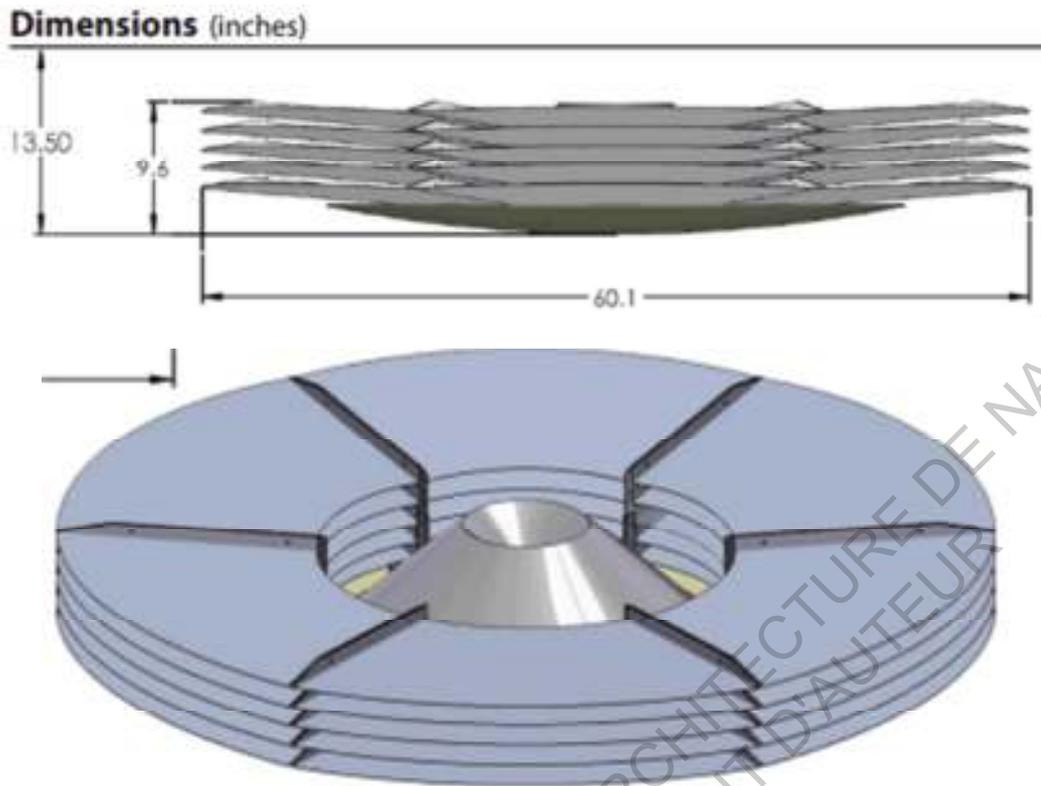
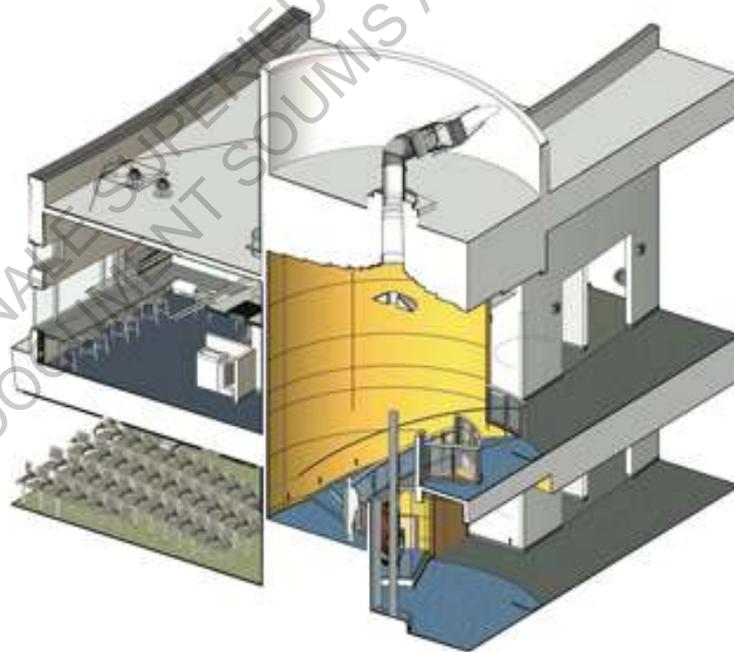


Figure 6-46 Dessins graphique. Détail géométrique de diffuseur. Sundolier (Sundolier.com)



3D - Sundolier Iso Section

Figure 6-47 Coupe. vue axonométrique. Projet équipé d'un Conduit à tube métallique. Sundolier (Sundolier.com)



Figure 6-48 Coupe. Vue axonométrique. Projet équipé d'un Conduit à tube métallique. Sundolier (Sundolier.com)



Figure 6-49 Coupe. Vue axonométrique. Projet équipé d'un Conduit à tube métallique. Sundolier (Sundolier.com)

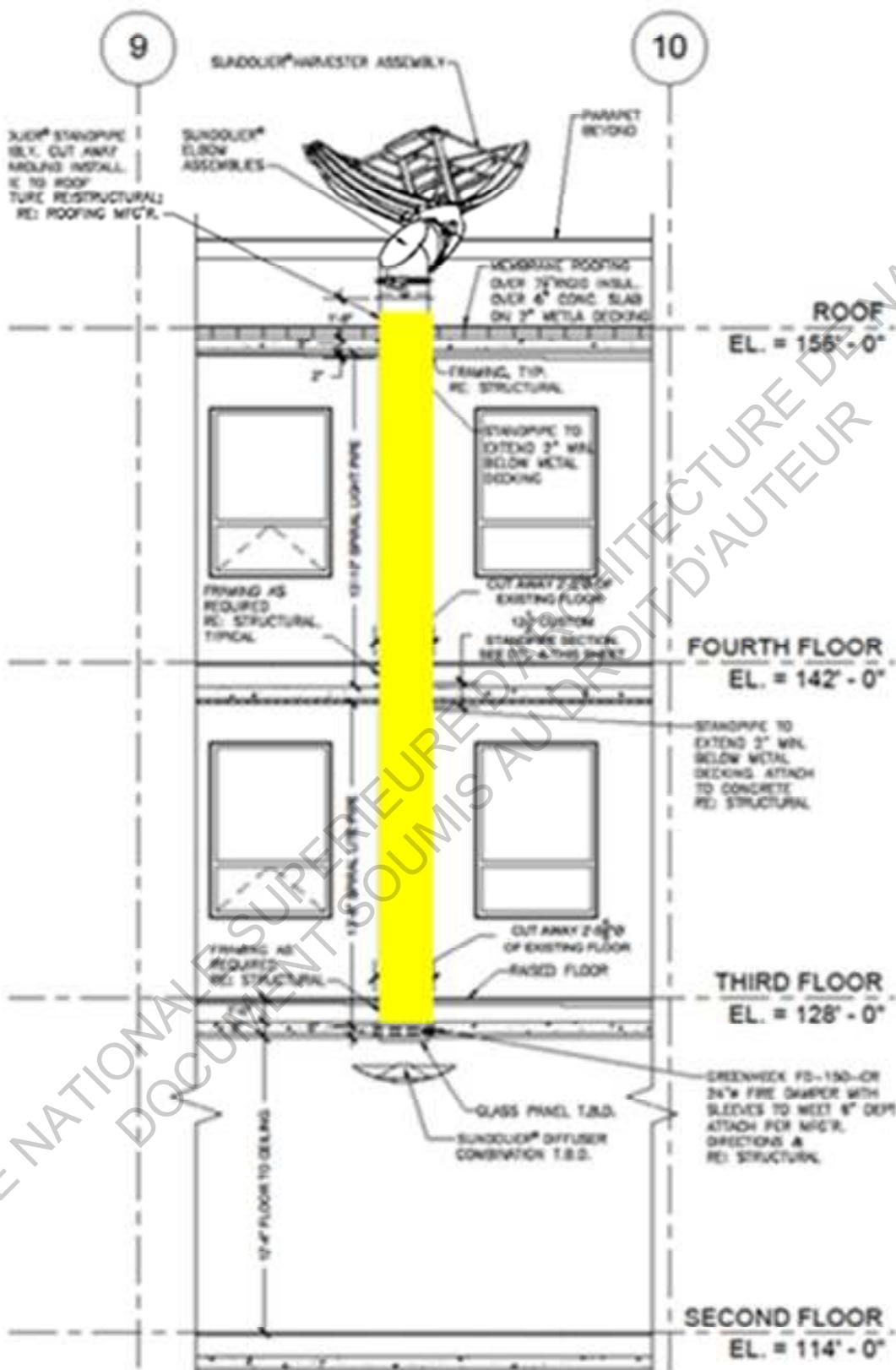


Figure 6-50 Coupe. conduit à tube prismatique. Sundolier (Sundolier.com)

2. Lumiduc à fibre optique :

Fabricant	Himawari, Parans, ECHY
Mode de captage	Actif
Mode de canalisation	Réflexion interne totale
Mode de diffusion	Ponctuel
Type de tube	Câble de fibre optique
Section du tube	Petite

Tableau 6-51 Caractéristiques des conduits de lumière à fibre optique: Himawari, Parans, Echy



Figure 6-52 Photographie. Capteur de lumiduc à fibre optique. Himawari (Himawari-net.co.jp)



Figure 6-53 Photographie. Capteur de lumiduc à fibre optique. Parans (Parans.com)

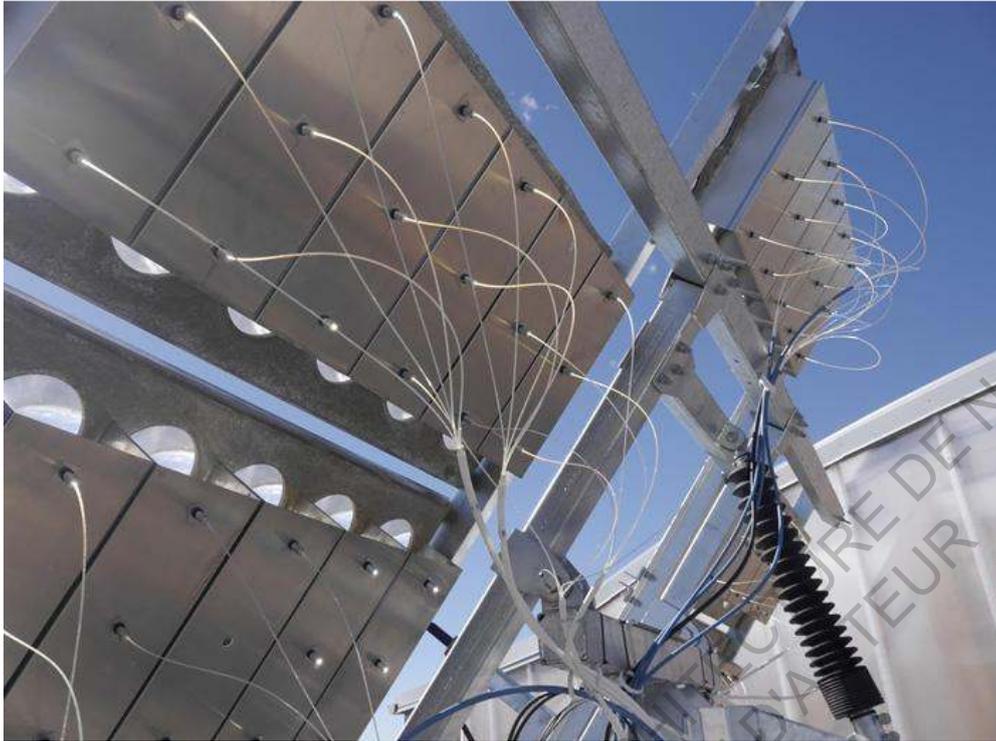


Figure 6-54 Photographie. tubes de fibre optique. Echy (Batirama.com)



Figure 6-55 Photographie. Diffusion – en spot- des lumiducs à fibre optiques (parans.com)



Figure 6-56 Coupe schématique. Lumiduc à fibre optique et forme urbaine. (Himawari-net.co.jp)

3. Tunnels de lumière :

Fabricant	Sun portal
Mode de captage	Actif
Mode de canalisation	Lumière est collimatée
Mode de diffusion	Ponctuel et linéaire
Type de tube	prismatique équipé de lentilles
Section du tube	grande

Tableau 6-57 Caractéristiques des tunnels de lumière: sunportal



Figure 6-58 Photographie. Miroir Héliostat. Sunportal (thesunportal.com)



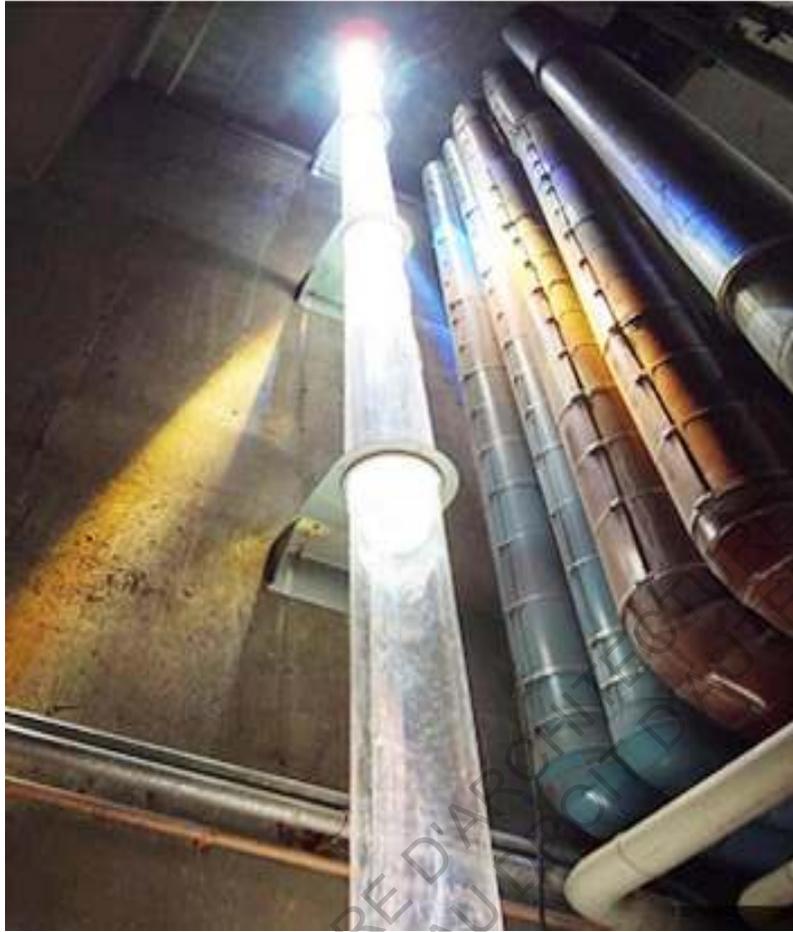
Figure 6-59 Photographie. Capteur concentrateur (type1). Sunportal (thesunportal.com)



Figure 6-60 Photographie. Capteur concentrateur (type2). Sunportal (thesunportal.com)



Figure 6-61 Photographie. Dispositif de captage du tunnel de lumière dans l'espace urbain.
Sunportal (thesunportal.com)



Figures 6-62 Photographies. Tube transporteur du tunnel de lumière. Sunportal (thesunportal.com)

7 Table des Figures

Figure 1-1 Schéma. Spectre de lumière naturelle. (kartable.fr)	10
Figure 1-2 Dessin. Les sources de la lumière naturelle. (Lechner, 2015)	11
Figure 1-3 Dessin. Distribution lumineuse par ciel dégagé (Lechner, 2015)	12
Figure 1-4 Graphique. Profondeur éclairée par une fenêtre verticale (Fontonynont et al, 2001).	15
Figure 1-5 Dessin. fenêtres zénithales (Lechner, 2015)	16
Figure 1-6 Dessin. Equivalent d'éclairage d'une fenêtre sous un ciel ensoleillé (Lechner, 2015)	16
Figure 1-7 Dessin. Equivalent d'éclairage d'une fenêtre sous un ciel couvert (Lechner, 2015)	17
Figure 1-8 Dessin. Influence de la couleur des surfaces extérieures sur le taux de lumière transmis (Lechner, 2015)	18
Figure 1-9 Dessin. Les Light shelves (Ruck et al, 2000)	20
Figure 1-10 Schéma. Verre déflecteur monté sur la façade. (Ruck et al. 2000)	21
Figure 1-11 Schéma. Verre déflecteur monté sur la toiture. (Ruck et al. 2000)	21
Figure 1-12 Verres déflecteurs. Coupe verticale (Ruck et al, 2000)	22
Figure 1-13 Verres déflecteurs. Coupe Horizontale (Ruck et al, 2000)	22
Figure 1-14 : Schéma. Principe de transmission d'un panneau coupé au Laser. (Ruck et al. 2000)	23
Figure 1-15: Schéma. Diffraction, Laser Cut Panel (Garcia-Hansen, 2006)	23
Figure 1-16 Schéma. Système anidolique (Ruck et al, 2000)	24
Figure 1-17 Dessin. Principe du Lumiduc (lightwaydaylight.co.uk)	26
Figure 1-18 Photographie, Ponte Building. Johannesburg	29
Figure 1-19 Photographie, Ponte Building, vue depuis le sommet Johannesburg ¹⁰	29
Figure 1-20 Photographie, ombre portée sur les niveaux inférieurs, Manhattan, New York. (nyhabitat.com)	30
Figure 2-1 Dessin. Canalisation de la lumière dans une tombe égyptienne	35
Figure 2-2 Croquis. Multireflexion de la lumière dans les tombes égyptiennes	35
Figure 2-3 Miroirs ardents d'Archimède. (Wikipédia)	36
Figure 2-4 Peinture. Miroir ardent d'Archimède, peint en 1600.	37
Figure 2-5 Frontispice. Usage des miroirs ardents.	38
Figure 2-6 Dessin de la Fontaine lumineuse de Colladon	39
Figure 2-7 photo de l'Héliostat de Silbermann	41
Figure 2-8 Photo de l'héliostat de Silberman, monté sur une fenêtre	42
Figure 2-9 Dessin du photophone d'Alexander Graham Bell (up-magazine.info)	44
Figure 2-10 Dessin. le photophone d'Alexander Graham Bell (up-magazine.info)	44
Figure 2-11 Dessin de l'appareil de conduite de lumière à l'intérieur d'une maison à deux étages. Wheeler (Wheeler, 1881)	46
Figure 2-12 Peinture représentant les Fontaines lumineuses à l'Exposition Internationale de Santé de Londres 1884 (old-print.com)	47
Figure 2-13 Peinture. Fontaines lumineuses de l'Exposition universelle de Paris 1889 (Musée Carnavalet, Paris)	48
Figure 2-14 Dessin. Coupe sur une fontaine lumineuse de l'exposition de Paris 1889 (Hecht, 1984)	48
Figure 2-15 Schéma. Réflexion interne totale dans un jet d'eau. (Hecht, 1984)	49
Figure 2-16 Schéma. Appareil de transport de lumière solaire dans le bâtiment par Hanneborg (Hanneborg, 1901)	50
Figure 2-17 Dessin. Coupe axonométrique sur le Depthscraper (ESMM.1931)	52

Figure 2-18 Dessin montrant le Verre prismatique sur les parois du bâtiment. Depthscaper (ESMM, 1931)	53
Figure 2-19 Dessin. Ecolopolis, Guy Rottier. (tectonicablog.com/?p=14724)	54
Figure 2-20 Dessin. Principe de transport de la lumière avec un lumiduc. Guy Rottier (tectonicablog.com/?p=14724)	54
Figure 2-21 Photographie. Expérimentations du principe Holographique	59
Figure 2-22 Photographie d'un Capteur Himawari. (himawari-net.co.jp)	60
Figure 2-23 Photographie. Panneau prismatique. L. Whitehead (The What's New Magazine, May 1988)	61
Figure 2-24 Schéma. Principe du Lumiduc à tube prismatique. Whitehead (The What's New Magazine, May 1988)	62
Figure 2-25 Image. Lumiduc à parois métalliques. (Solatubescotland.co.uk)	63
Figure 2-26 Schéma de principe du conduit à parois métalliques (Sutton, 1986)	63
Figure 3-1 Lumiduc à tube creux. Lightway (lightway.uk)	67
Figure 3-2 Photographie. Capteur d'un Lumiduc à tube solide (fibre optique). (Parans.com)	67
Figure 3-3. Schéma. Classement des <i>Light Guiding Systems</i> selon Nair et al. (Nair et al, 2013)	67
Figure 3-4 Graphique. Consommation énergétique pour la journée du 20/9/2007. (Curt Maxey et al, 2008)	78
Figure 3-5 Graphique. Consommation énergétique de Mars 2007-Juillet 2008 (Curt Maxey et al, 2008)	79
Figure 3-6 Coupe. Capteur de Projet Arthelio. Carpioano (Mingozzi, 2010)	81
Figure 3-7 Coupe. Tube canalisateur. Projet Arthelio. Carpioano (Mingozzi, 2010)	81
Figure 3-8 Coupe. Tube canalisateur. Projet Arthelio. Carpioano (Mingozzi, 2010)	82
Figure 3-9 Photographie. Diffuseur. projet Arthelio. (Mingozzi, 2001)	82
Figure 3-10 Photographie. Lowline. NY (thelowline.org)	84
Figure 3-11 Image. Capteurs. Lowline. NY (thelowline.org)	85
Figure 3-12 Photographies. A droite tube canalisateur. A gauche la Canoppé. Low Line NY. (thelowline.org)	85
Figure 3-13 Photographie. Tunnel de lumière. Lowline. NY (thelowline.org)	86
Tableau 4-1 Paramètres des lumiducs	89
Tableau 4-2 Catégories de lumiducs	90
Figures 4-3 Lumiduc horizontal à grande section	90
Figures 4-4 Lumiduc vertical à grande section (à gauche) et Lumiduc vertical à petite section (à droite)	91
Figure 4-5 photographie. capteur du Solar Canopy de L. Whitehead. (Source: youtube.com)	93
Figure 4-6 Schéma. Multiplication des surfaces horizontales	94
Figure 4-7 Coupe Schématique. Toiture suspendue	95
Figure 4-8 Photographie et coupe. Bâtiment multifonctionnel. J. Nouvel. Central Park, Sidney, Australie (pinterest.com). Bien que cet exemple de dispositif tend plus vers un plafond réflecteur servant pour éclairer la partie centrale du bâtiment que pour la toiture suspendue que nous venons de décrire, il nous permet néanmoins d'avoir une vision sur la forme de duplication possibles des surfaces horizontales dont les capteurs de lumiducs verticaux pourraient faire appel pour avoir une plus grande vue du ciel.	95
Figure 4-9 Schéma. La toiture confondue avec le sol (toiture = RDC)	96
Figure 4-10 Coupe Schématique. La toiture tendant à se confondre avec le sol (toiture = R+1)	96

Figure 4-11 Schéma. Adaptation de la forme initiale à une contrainte réglementaire urbaine : la trame viaire.	99
Figures 4-12 Coupe. Le maintien du niveau de la rue à son niveau initial fait qu'elle devienne couverte.	101
Figure 4-13 Coupe. Le rehaussement du niveau de la rue	102
Figure 4-14 Coupe. Rue souterraine.	102
Figure 4-15 . Coupe. accessibilité de la lumière naturelle dans les petits gabarits de rues. La lumière naturelle est en provenance de la forme bâtie.	102
Figure 4-16 Dessin. Silhouette urbaine, composé de l'addition des formes résultant de notre analyse.	104
Figures 4-17 Photographie. Lumiduc prismatique. James Carpenter. Washington DC. USA (carpenterlowings.com/portfolio_page/solar-light-pipe/)	105
Figure 4-18 Photo. Affiche de promotion. LowLine, NY (Source : Page FB. lowline)	107
Figure 6-1 Graphe, spectre lumineux transmis du lumiduc (Curt Maxey et al, 2008)	112
Figure 6-2 Tubes de lumiducs métalliques (Solatube.com)	112
Figure 6-3 Schéma. Détail d'une fibre optique	113
Figure 6-4 Schéma. Types de fibres optiques	114
Figure 6-5 Schéma. Principe de réflexion Interne totale (Walker et al, 1996)	114
Figure 6-6 Coupe. Composantes de la fibre optique (Himawari-net.co.jp)	115
Figure 6-7 Coupe schématique. Principe de transmission du lumiduc à fibre optique (Himawari-net.co.jp)	115
Figure 6-8 Schéma. Cone de diffusion du lumiduc à fibre optique (Himawari-net.co.jp)	115
Figure 6-9 Vue axonométrique. Composantes du tunnel de lumière (thesunportal.com)	116
Figure 6-10 Equation de calcule de taux de DPF pour un lumiduc droit. (Zhang et al, 2001)	117
Figure 6-11 Equation de calcule de taux de DPF pour un lumiduc coudé. (Zhang et al, 2001)	117
Figure 6-12 Performance de conduits à lumière a parois métalliques (Zhang et al. 2001)	118
Figure 6-13 Performance de conduits à lumière a parois métalliques (Zhang et al. 2001)	118
Figure 6-14 Performance de conduits à lumière a parois métalliques (Zhang et al. 2001)	119
Figure 6-15 Performance de conduits à lumière a parois métalliques (Zhang et al. 2001)	119
Figure 6-16 Performance des conduits de lumière métalliques (lightway.com)	120
Figure 6-17 Performance des conduits de lumière métalliques (solatube.com)	120
Figure 6-18 Performance des conduits de lumière métalliques (monodraught.com)	120
Figure 6-19 Performance des conduits de lumière métalliques (ECHY.fr)	121
Figure 6-20 Performance des conduits de lumière métalliques (Himawari-net.co.jp)	121
Figure 6-21 Caractéristiques des conduits de lumière à tubes métalliques	121
Figure 6-22 Photo. Conduit de lumière métallique (Solatube.com)	122
Figure 6-23 Photographie. Tube et diffuseur d'un conduit de lumière métallique (Solatube.com)	122
Tableau 6-24 Caractéristiques des conduits de lumière à tubes prismatique : Héliobus	123
Figure 6-25 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Héliobus (Heliobus.com)	123
Figure 6-26 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Héliobus (Heliobus.com)	123
Figure 6-27 Schéma. Conduit de lumière prismatique. Héliobus (Héliobus.com)	124
Figure 6-28 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Aspect Paysager. Héliobus (Heliobus.com)	124
Figure 6-29 Photographie. Tube-diffuseur de conduit de lumière prismatique (Heliobus.com)	124

Figure 6-30 Schéma. Photographie. Tube-diffuseur de conduit de lumière prismatique (Heliobus.com)	125
Figure 6-31 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Solarcanopy (Rosemann et al, 2007)	126
Figure 6-32 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Suncentrale (ecobuildingpulse.com)	126
Figure 6-33 Photographie. Capteur de conduit de lumière prismatique. Suncentrale (www.ecobuildingpulse.com)	127
Figure 6-34 Photographie. Capteur collimateur. Suncentrale (Suncentral.com)	127
Figure 6-35 Dessin. Capteur Suncentral (Suncentral.com)	128
Figure 6-36 Plan. Dimensionnement du capteur Suncentral (Suncentral.com)	128
Figure 6-37 Dessin. vue axonométrique capteur Suncentral (suncentral.com)	129
Figure 6-38 Photographie. Diffuseur Suncentral (Suncentral.com)	129
Figure 6-39 Photographie. Tube-diffuseur de conduit de lumière prismatique. Solarcanopy (Rosemann et al, 2007)	130
Figure 6-40 Dessin. Luminaire prismatique. Suncentral (suncentral.com)	130
Tableau 6-41 Caractéristiques des conduits de lumière : Sundolier	131
Figure 6-42 Photographie. Capteur de conduit de lumière. Sundolier (Sundolier.com)	131
Figure 6-43 Photographie. Diffuseur conduit à tube métallique. Sundolier (Sundolier.com)	131
Figure 6-44 Photographie. Diffuseur conduit à tube prismatique. Sundolier (Sundolier.com)	132
Figure 6-45 Dessins. Dimensions diffuseur à lentille. Sundolier (Sundolier.com)	132
Figure 6-46 Dessins graphique. Détail géométrique de diffuseur. Sundolier (Sundolier.com)	133
Figure 6-47 Coupe. vue axonométrique. Projet équipé d'un Conduit à tube métallique. Sundolier (Sundolier.com)	133
Figure 6-48 Coupe. Vue axonométrique. Projet équipé d'un Conduit à tube métallique. Sundolier (Sundolier.com)	134
Figure 6-49 Coupe. Vue axonométrique. Projet équipé d'un Conduit à tube métallique. Sundolier (Sundolier.com)	134
Figure 6-50 Coupe. conduit à tube prismatique. Sundolier (Sundolier.com)	135
Tableau 6-51 Caractéristiques des conduits de lumière à fibre optique: Himawari, Parans, Echy	136
Figure 6-52 Photographie. Capteur de lumiduc à fibre optique. Himawari (Himawari-net.co.jp)	136
Figure 6-53 Photographie. Capteur de lumiduc à fibre optique. Parans (Parans.com)	136
Figure 6-54 Photographie. tubes de fibre optique. Echy (Batirama.com)	137
Figure 6-55 Photographie. Diffusion – en spot- des lumiducs à fibre optiques (parans.com)	137
Figure 6-56 Coupe schématique. Lumiduc à fibre optique et forme urbaine. (Himawari-net.co.jp)	138
Tableau 6-57 Caractéristiques des tunnels de lumière: sunportal	138
Figure 6-58 Photographie. Miroir Héliostat. Sunportal (thesunportal.com)	139
Figure 6-59 Photographie. Capteur concentrateur (type1). Sunportal (thesunportal.com)	139
Figure 6-60 Photographie. Capteur concentrateur (type2). Sunportal (thesunportal.com)	140
Figure 6-61 Photographie. Dispositif de captage du tunnel de lumière dans l'espace urbain. Sunportal (thesunportal.com)	140
Figures 6-62 Photographies. Tube transporteur du tunnel de lumière. Sunportal (thesunportal.com)	141

8 Bibliographie

- Adam M. (2010).** *Densité : étude transversale de l'évolution de la forme urbaine d'un quartier de grands ensembles, Entre arguments environnementaux et perceptions habitantes.* Architecture, aménagement de l'espace.
- Bae H. (1977).** *Solar Designing by James Lambeth.* James Lambeth Pub.
- Baker N. et Steemers K. (2000)** *Energy And Environment in Architecture: A Technical Design Guide.* Taylor & Francis
- Baroncini C. et al. (2010).** *Numerical and experimental analysis of the 'Double Light pipe'. a new system for daylight distribution in interior spaces.* Faculty of Architecture. Pescara. Italy. Internationale Journal Of Low Carbon Technologies.
- Barrett R. (July 2003).** *Natural Lighting of Deep Architectural Space. The Perception Of New Zeland Architects.* Archnet-IJAR. Volume 2 – Issue 2-. pp. 103-124.
- Belmaaziz M. (1997).** *Les effets de l'orientation sur les ambiances lumineuses et thermiques dans les galeries couvertes des établissements d'enseignement.* DEA : Ambiances Architecturales et Urbaines options : thermiques et énergétiques. ISITEM & ENSA Nantes & ENSA Grenoble.
- Benharket S. (2006).** *Impact de l'éclairage naturel zénithal sur le confort visuel dans les salles de classes.* Mémoire de magister. Département d'Architecture et d'Urbanisme. Université Mentouri. Constantine
- Bessand N. (2005).** *L'épaisseur de la densité ou qualité revisitée de l'habitat condensé.* Cahier Matière n°7. EPFL.
- Bobinet J. (1842).** *Note sur la transmission de la lumière par des canaux sinueux.* Compte-Rendu de l'académie des sciences (15). p. 802.
- Boubekri M. (2008).** *Daylighting, Architecture and Health, Building Design Strategies,* Routledge.
- Burt W. et al. (1969).** *Windows and Environment,* Pilkington Brothers Limited.
- Butti K. et Perlin J. (1980).** *A Golden Thread: 2500 years of architecture and technologies.* Cheshire Books.
- Carter D.J. (2014).** *LRT Digest 2 Tubular daylight guidance systems.* University of Liverpool. UK. Lighting Res. Technol. Vol. 46: 369–387.
- Carter D.J. et Al Marwae M. (2009).** *user attitudes toward tubular daylight guidance systems.* School of architecture. University of Liverpool. UK.
- Carter D.J. (2002).** *the measured and predicted performance of passive solar light pipe systems.* Light. Res. Technol. 34. 39–52.
- Cenival J-L. (1964).** *Egypte. Epoque pharaonique.* Architecture universelle. Office du livre, Freiburg
- Chelkoff G. (1995).** *La fabrication des ambiances souterraines : présence du public et configuration sensible (voir et entendre).* In : Espace et urbanisme souterrains, actes de la 6ème Conférence Internationale (sous la dir. De Sabine Barles). Paris. Grande Halle

de la Villette. Paris : Institut Français d'Urbanisme. Laboratoire Théorie des Mutations urbaines. pp. 295-302.

Colladon J-D. (1842). *Sur les réflexions d'un rayon de lumière à l'intérieur d'une veine liquide parabolique.* Compte-Rendu de l'académie des sciences (15). pp. 800-802

Collin R.E. (2001). *Foundations for Microwave Engineering.* 2nd Ed. John Wiley & Sons publications.

Courret G. Scartezzini J-L. et Francioli D. (1998). *Design and assessment of an anidolic light-duct.* Energy and Building. 28. pp.79-99.

Curt Maxey L. et al, (2008). *Hybrid Solar Lighting: Final Technical Report and Results of Field Trial Program,* by Oak Ridge National Laboratory (ORNL). For the U.S. Department of Energy.

DeKay M. (2010). *Daylighting and Urban Form: An Urban Fabric of Light.* Journal for architectural and planning research 27: 1 (Spring 2010) 35. Chicago. USA.

Delétré J.J. (2003). *Mémento de prise de jour et protections solaires.* Ecole Nationale Supérieur d'Architecture de Grenoble. 25 Nov. Consulté le 6/4/16.

Derlande J. et Dumortier D. (2015). *Amélioration par L'éclairage de l'acceptabilité des espaces souterrains.* VILLE 10D – Ville d'Idées. Projet National de Recherche et Développement. Tranche 2. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.

Derlande J. et Dumortier D. (2014). *Influence de l'éclairage sur la perception des espaces souterrains par les usagers.* VILLE 10D – Ville d'Idées. Projet National de Recherche et Développement. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat. Tranche1.

Deroisy B. et Deneyer A. (2013). *Daylight and solar access at urban scale: a methodology and its application to a high density development in Brussels.* Belgian Building Research Institute BBRI. Brussels.

Devillers C. et al. (1982). *Rues couvertes : recherche sur les propriétés climatiques et thermiques, acoustiques, sociales, architecturales et urbaines des espaces collectifs à effet de serre.* Paris : A.U.A Recherche. Plans de construction.

Everyday Science and Mechanics Magazine. (Nov 1931). Ed. Hugo Gernsback. pp. 646. 708.

Fontoynt M. Perraudeau M. et Avouac P. (2011). *Construire avec la lumière naturelle.* CSTB & ADEM. Paris.

Forget S. (2010). *La fontaine lumineuse de Colladon.* Laboratoire de Physique du Laser –Université Paris 13-. fontainelaser.fr.

Garcia-Hansen V. et al. (March 14-17 2010). *Perception of Daylight Quality Delivered by Light Transport Systems.* Queensland University of Technology. Australia. Proceeding of the CIE 2010 Lighting Quality & Energy Efficiency.

Garcia-Hansen V. (2006). *Innovative Daylighting Systems for Deep-Plan Commercial Building.* PhD Thesis. School of Design. Queensland University of Technology.

Garcia-Hansen V. et Edmonds I. (June 2003). *Natural illumination of deep-plan office building: light pipe strategies.* In: ISES Solar World Congress. Goteborg. Suède.

Graham Bell A. (1880). Brevet US235199A. *Apparatus for signaling and communicating, called Photophone.* dépôt 28 août 1880. publié 7 déc.

Gordon Franck, (consulté en Mars 2016). *Denderah : Expériences de résurrection ou éclairage électrique dans l'antique Egypte,* Centre Internationale de Recherches sur les Anciennes Civilisations (CIRAC.org)

CIRAC.Hanneborg O. B. H. (26 Fév. 1901). Brevet US668404. *Apparatus for transmitting sunlight to basements or other stories.* dépôt 19 Fév. 1900.

Hecht J. (1999). *City of Light. The Story of Fiber Optics.* Oxford University press.

Hecht J. (12 Jan.1984). *Fiber optics calls up the past.* dans : *New Scientist.* pp. 12-14.

Hobday R. (2006). *The light revolution, health, architecture and the sun.* Findhorn press.

Jeury M. (2013). *La vallée du temps profonds.* Les moutons électriques.

Johnson W.K. (Juin 2004), M.D. *Epochs in Endourology. The Birth of Fiber optics from "Light Guiding".* dans : *Journal of Endourology.* Volume 18. N°5. Mary Ann Liebert. Inc.

Kahn G., (2008). *L'esthétique de la rue,* Infolio Editions.

Keeler M. et Burke B. (2009). *Fundamentals of Integrated Design for Sustainable Building,* Wiley, p. 129.

Koolhaas R. (2002). *New York Délire (1978). Un Manifeste rétroactif pour Manhattan.* traduit au Français par Catherine Collet. Parenthèses Editions.

Kwok C.M. (2011). *A study of horizontal light pipe system for interior daylighting in a dense urban environment,* Phd Thesis, The Hong Kong Polytechnic University.

Lamunière I. (2004). *Four Cities : Milan, Paris, Londres, New York,* Presse Polytechnique Universitaire Romande.

Laouadi A. et al. (2013). *Tubular daylighting devices. Part 1: Development of an optical model (1415-RP).* Construction portfolio. National Research Council of Canada. Ottawa. HVAC & Research. 19. pp. 536-556.

Lechner N. (2015). *Heating, Cooling, Lighting, Sustainable Design Methods for Architects,* Ed. 4, John Wiley & Sons

Les cahiers de CANTERCEL. (2002). *Réflexion sur l'enveloppe du bâtiment : Enveloppe et Murs.* Cahier n° 2. Edisud. Aix-en-Provence

M.C. Lam W. (1986). *Sunlight as Formgiver,* Van Nostrand Reinhold

Malet-Damour B. et al. (Jan 2015). *Performance testing of light pipes in real weather conditions for a confrontation with Hemera.* (PIMENT) Université de la Réunion. *Journal of Clean Energy Technologie.* Vol. 5. No. 1.

Manfroid J. (2013). *Les miroirs ardents.* Institut d'Astrophysique et de Géophysique de Liège. Publié dans *orbi.ulg.ac.be – université de Liège-*

Massiot G. (1907). *Les projections scientifiques et amusantes.* Gauthier-Villars. Paris.

Mayhoub M.S. (2014). *Dual ducting: An innovation to increase the use of daylight in buildings.* Architecture Department. Architecture Departement. Faculty of Engineering Al-Azhar University. Cairo. Egypt.

Mayhoub M.S. et al. (2012). *Hybrid Daylighting Systems: Performance and Design.* School of Architecture University of Liverpool. *Lighting Research and Technologies*; 44: 261-276.

Miles L. (2010). *l'Architecture élément par élément*, Citadelles & Mazenod.

Mingozzi A. Bottiglioni S. (Ricerca & Progetto Ricerca & Progetto Galassi. Mingozzi e associati Ingegneria. architettura. ambiente) et R. Casalone (A.L.C.S. Advanced Lighting Consulting Services S.r.l.). (2001). *An Innovative System For Daylight Collecting And Transport For Long Distances And Mixing With Artificial Lighting Coming From Hollow Light Guides.* Arthelio progetto. Carpiano. Italia.

Moley C. (2006). *Les abords du chez, soit en quête d'espaces intermédiaires.* Editions de la Villette. Paris.

Nair M.G. et al. (2013). *Classification of Indoor Daylight Enhancement Systems* Indian Institute of Technology of Madras. India.

Neufert Ernst. (1996). *Les éléments des projets de construction.* « l'homme mesure de toutes choses ». 7^{ème} édition. DUNOD.

Nilsson A.M. et al. (2014). *Spectrometric measurement and ray tracing simulation of mirror light pipe to evaluate the color of the transmitted light.* *Solar Energy Materials & solar cells* 124. pp. 172-179.

Oakley G. Riffat S.B. et Shao L. (2000). *Daylight Performance Of Lightpipes.* Institute of Building Technology. School of the Built Environment. University of Nottingham.

Panerai Philippe et al, (1999). *Analyse Urbaine*, Edition Parenthèse.

Paroncini M. Calcagni B. et Corvaro F. (2007). *Monitoring of a light-pipe system.* Dipartimento di Energetica. Università Politecnica delle Marche. via Brecce Bianche. 60100 Ancona. Italy.

Payard F. (traduit par). (1844). *Oeuvre d'Archimède.* Ed. François Buisson. Paris.

Pétonnet C. (1989). *Entre nostalgie et prospective : le temps présent. L'état de la France et de ses habitants.* ss la dir. Minelle Verdié. La Découverte. pp.46-50. L'état du monde.

Plassart S. (Sep 2015). *L'atrium central dans les bâtiments tertiaires contemporains. L'intériorité par l'Atrium, usages et ambiances aux cœurs des bureaux,* Mémoire d'initiation à la recherche, ENSA Nantes.

Preamechai S. (2006). *Dispositifs architecturaux et mouvements qualifiés : recherche exploratoire sur les conduites sensori-motrices des passants dans les espaces publics intermédiaire.* Domain_Other. Université Pierre Mendès-France – Grenoble II. Français <tel-00087820>.

Reiter S. et De Herde A. (2003). *l'éclairage naturel des bâtiments.* Presse universitaire de Louvain.

Rosemann A. et al. (2008). *Cost-effective controlled illumination using daylighting and electric lighting in a dual-function prism light guide.* Department of Physics and Astronomy. University of British Columbia. Canada. *Lighting Res. Technol.*; 40: 77–88.

Rottier G. (Mars 1972). *Lumiduc Architecture*. Coopération Méditerranéenne Pour l'Energie Solaire (COMPLES). Bulletin n° 22. pp. 75-81.

Ruck N. et al. (July 2000). *Daylight in buildings. a source book on Daylighting Systems and Components*. A report of the International Energy Agency IEA SHC Task 21/ ECBCS Annex 29.

Salat S. et al. (2011). *les villes et les Formes*. Laboratoire des Morphologies Urbaines du CSTB. Hermann.

Secchi B. et Viganò P. (équipe Studio 08). (2008). *La métropole du XXIème siècle de l'après-Kyoto; la ville "poreuse": état d'avancement du chantier 1*. Consultation internationale de recherche et développement sur le grand pari de l'agglomération parisienne. Milan.

Silvestri C. (2009). *Perception et Conception en architecture Non-standard, une approche pour l'étude des processus de conception spatiale des formes complexes*, Thèse de doctorat, université de Montpellier 2.

Siret D. (2013). *Les sensations du soleil dans les théories architecturales et urbaines. De l'hygiénisme à la ville durable*. Robert Beck. Ulrike Krampfl. Emmanuelle Retailaud-Bajac. Les cinq sens de la ville du Moyen Age à nos jours. Presses universitaires Francois-Rabelais (PUFR). 978-2-86906-289-4. dans <<http://pufr-editions.fr/9782869062894>>. <halshs-01246925>.

Soleri P. (1980). *Archologie la ville à l'image de l'homme*. Ed Parenthèses.

Stratis S. (2008). *"Welcome Back in My Back Yard": an exploration of urban porosity creating a porous urban connective tissue*, STRATEGIES AND NEGOTIATED PROJECTS 2, Venise Biennale.

The what's New Magazine. (May 1988). *Popular Science*. USA.

Tribel F. (1985). *Entre science-fiction et prospective, à propos du logement collectif*. TPFE.

Une société de gens de lettres. (15 Mai 1778). *Journal des sciences et des beaux-arts dédié à Mr. Le Comte d'Artois*. Bureau d'administration. Cours de Rohan. Tome 3. N° 9. Paris.

Utudjian E. (1966). *Architecture et urbanisme souterrains*. Société d'impression publicitaire Montreuil. Paris.

Victoria Government Gazette. (Juin 1894). *Official List of Patents and Trade Marks for the Month of May 1894*. publié par l'Autorité de l'état de Victoria. Australie. 91.

Von Meiss P. (2012). *De la forme au lieu + de la tectonique*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).

Walker R.S. et al, *Remote Source Lighting with Fiber optics*, The University of Texas at Arlington, November 1996.

Wheeler W. (20 Sept. 1881). Brevet US247229. *Apparatus for lighting dwellings or other structures*. dépôt 10 Déc. 1880.

Zhang X. et al. (2015). *Design of Solar Optical Fiber Lighting System for Enhanced Lighting in Highway Tunnel Threshold Zone: A Case Study of Huashuyan Tunnel in*

China. Beijing Jiaotong University. Beijing. China. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy. Article ID 471364. 10 pages.

Zhang X. Muneer T. Kubie J. (2001). *A Design Guide for Performance Assessment Of Solar Light-Pipes.* School of Engineering. Napier University. Edinburgh.

9 Webographie

youtube.com

<http://www.frac-centre.fr/collection-art-architecture/rottier-guy/ecopolis-ville-solaire-64.html?authID=164&ensembleID=944>

<http://www.who.int/uv/faq/uvhealthfac/fr/>

http://www.biffsa.com/ressource_types/view/10

[http://www.messynessychic.com/2013/04/08/anywhere-but-here-ponte-tower/ \)](http://www.messynessychic.com/2013/04/08/anywhere-but-here-ponte-tower/)

CIRAC.org

Idi5.com

rees-d-ailleurs.com/pages/mes-carnets-de-voyage/egypte/

http://rhe.ish-lyon.cnrs.fr/instruments-scientifiques/instr_opt_heliostat.html

[https://www.youtube.com/watch?v=Ywy4LgXHY78#t=71\).](https://www.youtube.com/watch?v=Ywy4LgXHY78#t=71)

Ben Richmond

trees.ancestry.com.au

www.blog.jeury.fr/pages/michel-jeury

<http://www.maxigadget.com/tag/holographie>

dictionnaire.reverso.net/francais-definition/lumiduc

<http://davidjbennettarchitect.net/>

thelowline.org

carpenterlowings.com/portfolio_page/solar-light-pipe/

Page FB. Lowline

Solatube.com

Solatubescotland.co.uk

Lightway.com

Monodraught.com

Himawari-net.co.jp

thesunportal.com

ECHY.fr

Heliobus.com

ecobuildingpulse.com

Suncentral.com

Sundolier.com

Parans.com

Batirama.com

Pinterest.com

nyhabitat.com

tectonicablog.com/?p=14724

kartable.fr

energieplus-lesite.fr

http://www.biffsa.com/ressource_types/view/10
Wikipédia.fr

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR