



HAL
open science

L'éternel été chez soi. Dispositifs contemporains d'artificialisation du rayonnement solaire et de la lumière naturelle

Céline Drozd, Ignacio Requena-Ruiz, Daniel Siret

► **To cite this version:**

Céline Drozd, Ignacio Requena-Ruiz, Daniel Siret. L'éternel été chez soi. Dispositifs contemporains d'artificialisation du rayonnement solaire et de la lumière naturelle. [Rapport de recherche] Leroy Merlin Source / UMR 1563 AAU - CRENAU - ENSA Nantes. 2018, pp.74. hal-02188438

HAL Id: hal-02188438

<https://hal.science/hal-02188438>

Submitted on 18 Jul 2019

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



Céline DROZD, architecte enseignante chercheuse
Ignacio REQUENA, architecte enseignant chercheur
Daniel SIRET, architecte chercheur

L'éternel été chez soi

Dispositifs contemporains d'artificialisation
du rayonnement solaire et de la lumière
naturelle



**Céline
DROZD**

Architecte,
ingénieure
de recherche,
Ensa Nantes,
CRENAU,
UMR CNRS AAU



**Ignacio
REQUENA**

Architecte
Enseignant
Chercheur,
maître de
conférences
ENSA Nantes,
CRENAU,
UMR CNRS AAU



**Daniel
SIRET**

Architecte,
Docteur HDR,
École nationale
supérieure
d'architecture de
Nantes, CRENAU,
directeur UMR
CNRS AAU,
Ambiances
Architectures
Urbanités

Avec la participation des étudiants

Mohammed Attaoua, École nationale supérieure d'architecture de Nantes

Aurore Leloup, Université Toulouse Jean Jaurès

Anna Ponizy, École nationale des travaux publics de l'État, Lyon

Mélanie Richer, École nationale supérieure d'architecture de Nantes

les chantiers LEROY MERLIN Source

Direction de la publication :

Carine Negroni,
directrice de l'éditorial,
de l'expression de la marque
et des savoirs de l'habitat

Coordination éditoriale :

Denis Bernadet, animateur scientifique,
Leroy Merlin Source

Coordination graphique - maquette :

Emmanuel Besson

Corrections - relectures :

Béatrice Balmelle

Décembre 2018

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 5 |
| 1. Contexte et cadrage de la recherche | 5 |
| 2. Approche méthodologique | 9 |
| 3. Plan du rapport | 10 |
| Capter, transporter, diffuser les flux lumineux | 13 |
| 1. La recherche de maîtrise de la lumière naturelle à travers l'histoire | 13 |
| 2. Le lumiduc contemporain | 19 |
| Définitions | 19 |
| Types de lumiducs et fabricants | 22 |
| Efficacité lumineuse du lumiduc | 24 |
| Ambiance lumineuse associée au lumiduc | 26 |
| Intérêt énergétique du lumiduc | 26 |
| 3. Éléments de discussion | 27 |
| Simuler l'expérience de la lumière naturelle | 29 |
| 1. L'expérience du soleil | 29 |
| 2. Installations artistiques | 31 |
| Sculptures de lumière | 31 |
| Permanence d'un moment lumineux | 32 |
| Accélération de la course du soleil | 33 |
| Suggestion d'une source lumineuse extérieure | 33 |
| 3. Dispositifs d'éclairage | 37 |
| Dispositifs de simulation physique de la lumière | 38 |
| Dispositifs de simulation physiologique des effets de la lumière naturelle | 39 |
| Dispositifs de suggestion intégrant une mise en scène lumineuse | 44 |
| CoeLux® : vision du soleil et sensation de profondeur du ciel | 47 |
| 4. Dispositifs médicaux de luminothérapie | 50 |
| Voir le soleil chez soi : une étude empirique | 57 |
| 1. La tache solaire et la suggestion du beau temps chez soi | 57 |
| Le beau temps | 57 |
| Tache lumineuse du soleil | 58 |
| 2. Une méthode de recherche pour évaluer le ressenti lié à la tache solaire | 59 |
| Évaluation globale de l'impact de la tache solaire sur des espaces domestiques | 59 |
| Qualification des ambiances lumineuses produites par une tache solaire | 63 |
| 3. Analyse de l'effet d'une tache solaire chez soi | 64 |
| Effet positif sur la perception des images | 64 |
| Effet consensuel de la présence de la tache solaire dans les images | 66 |
| Association au beau temps | 68 |
| Suggestion du rapport à l'extérieur | 69 |
| Une impression générale et un rapport intuitif à la tache solaire | 69 |
| 4. Éléments de conclusion | 70 |

ANNEXE

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Bibliographie générale | 71 |
|-------------------------------------|-----------|



**L'ensoleillement en baisse :
rendez-nous la lumière !**

Introduction

1. Contexte et cadrage de la recherche

En janvier 2018, une salve d'articles de presse met en évidence comme un fait de société des minutes de soleil « perdues » par rapport à ce que les moyennes météorologiques permettraient d'espérer. Le 10 janvier, la Voix du Nord se demande : « *Le record de 1948 de manque de soleil en janvier sera-t-il battu ?* »¹. Deux jours plus tard, le même journal lance un appel : « *Disparition : toujours pas de preuve de vie du soleil* »², et renchérit dans l'édition du dimanche 14 janvier : « *Il est mort le soleil ?* »³. L'Est Républicain s'alarme : « *Dans le Nord, "on n'a pas vu le soleil depuis 66 jours"* »⁴. Même le sud du pays s'inquiète, comme l'évoque le titre de La Dépêche : « *L'enseillement en baisse : rendez-nous la lumière !* »⁵. Cette inquiétude dépasse les frontières. The Guardian titre ainsi sur l'hiver le plus noir en Europe, et publie une cartographie des différences entre l'enseillement constaté en janvier 2018 et l'enseillement moyen d'un mois de janvier⁶.



Ces articles alarmistes s'appuient sur des analyses mettant en évidence un déficit statistique d'ensoleillement de 30 à 50 % par rapport à la moyenne de référence 1991-2010 (MétéoFrance, 2018). Ils insistent sur un manque, une perte, et finalement sur une privation de soleil. « *La France en manque de soleil* » titre France TV Info⁷. Le Parisien propose un recensement : « *Ville par ville, où le soleil manque-t-il le plus en France ?* »⁸. Les Décodeurs du Monde font le bilan début février : « *De combien d'heures de soleil avez-vous été privés par rapport à la normale, en janvier 2018 ?* »⁹. La Voix du Nord s'aventure dans le constat de nouvelles inégalités territoriales : « *À Brest, on se vautre dans le soleil* »¹⁰, allant à contre-courant de l'image habituelle de la ville bretonne.

Les effets de cette privation sont mis en avant. Ainsi selon Europe1, « *le très faible ensoleillement nous plombe le moral* »¹¹. Le Nord souffre... La Montagne vient en aide en titrant sur « *Nos conseils pour vous aider à faire face au manque de soleil en Auvergne en ce début d'année* »¹². Des solutions sont avancées : absorber de la vitamine D, adopter la luminothérapie artificielle ou naturelle (s'exposer lorsque le soleil est là), etc.

L'attention portée par la presse aux durées d'ensoleillement statistiquement plus faibles en France en janvier 2018 confirme l'extrême sensibilité de nos sociétés aux variations météorologiques et au climat immédiatement perceptible. Les minutes de soleil supposées perdues sont décrites comme une catastrophe. En revanche, le fait que ce même mois de janvier 2018, privé de soleil, ait été le plus chaud depuis 1900, est une information très peu relayée. Alors que la météorologie hivernale porte en elle une nécessaire dose de froid, de pluie ou de neige, et les satisfactions écologiques et esthétiques qui en découlent, les journaux relaient le sentiment d'une perte de minutes de soleil vécue comme une forme de spoliation.

Des chercheurs s'interrogent sur un « héliotropisme mondialisé » qui verrait les populations se déplacer massivement vers les régions pourvues d'un climat ensoleillé.

Spécialiste de la perception du climat, l'anthropologue Martin de la Soudière a montré depuis longtemps comment nos sociétés sont devenues météophiles voire « météomanes ». Son analyse de notre « intranquillité météorologique » (La Soudière, 1999, p. 317) fait écho au sentiment relayé par les journaux de janvier 2018 :

« Profondément déceptive (...) la météo semble n'avoir été inventée que pour nous contrarier (...). Le souci du temps s'est déplacé de l'économique au psychologique, du registre du travail à celui du loisir et du confort. Il est devenu pour nous un élément de la (fameuse) qualité de vie, un luxe, une délicatesse, une exigence qui peut faire sourire celui qui est réellement exposé à longueur d'année à l'inclémence du temps. »
(La Soudière, 1999, p. 315-316).

Au creux de cette insatisfaction apparaît l'attente toujours déçue d'un climat idéal, celui qui naît de l'association du soleil radieux, du ciel bleu et des températures clémentes ou chaudes. Construction sociale figeant une sorte d'éternel été méditerranéen (Tabeaud, 2017), le « beau temps » est devenu une norme culturelle fondamentalement associée au bonheur comme l'ont analysé Nicole Phelouzat (2010) ou Christophe Granger (2004) qui évoque avec brio « *la température du bonheur* » qui est celle du « *beau fixe* » et des vacances. « *J'ai besoin de lux !* » s'exclame une lectrice privée de soleil dans les commentaires en ligne de l'un des articles cités plus haut¹³, témoignant que par une sorte d'inversion, le bonheur ne se conçoit plus sans beau temps.

Le goût pour le soleil qui s'est progressivement construit tout au long du vingtième siècle, comme l'ont montré les historiens de la culture (Granger, 2004 ; Ory, 2008 ; Urbain, 2014), traverse désormais les couches sociales pour devenir un désir partagé. Il est intériorisé comme un besoin vital jusqu'à transformer notre rapport au climat. Nous adorons le soleil car nous l'avons défini comme essentiel à notre santé, à notre bien-être psychique et aux nécessités de nos vies collectives. Dès lors la « recherche du soleil » fait partie de nos vies et s'inscrit dans nos manières d'habiter ainsi que dans l'organisation de notre environnement immédiat.

Ainsi, à l'échelle des territoires, l'attrait pour le beau temps et les climats ensoleillés est l'une des causes des migrations mises en évidence dans les études démographiques à travers plusieurs pays. Des chercheurs s'interrogent sur un « héliotropisme mondialisé » qui verrait les populations se déplacer massivement vers les régions pourvues d'un climat ensoleillé. Aux États-Unis, le *Sun Belt* est littéralement cette « ceinture de soleil » qui comprend les états du pourtour méridional caractérisés par un climat chaud, un certain dynamisme économique et une forte croissance démographique depuis les années 1970-1980¹⁴. L'héliotropisme qui définit ce terme n'est pas la seule raison du succès de cet ensemble d'états mais il est l'un des facteurs importants de leur attrait.

En France, à une échelle plus réduite, les études montrent depuis plusieurs décennies les migrations vers le sud qui structurent un équilibre géographique opposant, dans l'imaginaire commun, un nord supposé pluvieux, triste et laborieux, à un sud supposé solaire, festif et oisif. On peut noter cependant que le réchauffement climatique pourrait inverser ce mouvement et conduire à ce que certains appellent un « héliotropisme négatif » vers les régions plus tempérées (Grapin, 2017)¹⁵.

Privilégiant une prise de distance et une forme de repli sur soi, notre rapport au soleil se serait alors en quelque sorte « technologisé » et privatisé.

Les phénomènes de migration résidentielle relèvent de la très grande échelle et résultent des interactions entre représentations culturelles de la qualité de vie, dynamisme économique régional et vieillissement de la population. À l'échelle locale qui nous intéresse plus spécifiquement, le désir de beau temps et l'appétence pour le soleil se mettent en œuvre dans les choix d'habitat, dans la forme donnée à son architecture et dans l'organisation du chez-soi. Le désir héliotropique conditionne ainsi l'organisation du logement, en privilégiant les grandes ouvertures et les orientations solaires sud et ouest supposées les plus favorables (Rodriguez & Siret, 2004). Ces préférences sont le résultat des transformations importantes de la pensée architecturale et urbaine qui ont accompagné l'évolution du goût pour le soleil dans les sociétés occidentales au cours du siècle dernier, comme nous l'avons montré dans nos travaux précédents (Siret, 2011, 2013).

Nous héritons ainsi collectivement de l'héliotropisme de la modernité et de l'hédonisme solaire insouciant des Trente Glorieuses, manifestant un rapport au soleil frontal, immédiat, fusionnel si bien résumé par le slogan « sous le soleil exactement »¹⁶. Progressivement, cette insouciance a cependant fait place à une inquiétude solaire nouvelle face aux dangers du rayonnement pour notre propre corps – cancers cutanés – comme pour la vie en général¹⁷ et pour la ville en particulier¹⁸. L'une des hypothèses qui guident nos travaux est qu'après la gloire solaire de la modernité, notre rapport au soleil aurait changé en même temps que notre rapport à l'environnement. Privilégiant une prise de distance et une forme de repli sur soi, notre rapport au soleil se serait alors en quelque sorte technologisé et privatisé. Le passage d'une architecture d'exposition solaire directe et collective – les murs rideaux, les villes en barres – à une architecture de captage énergétique individualisé fait partie de ce mouvement. Cette hypothèse nous amène à questionner l'architecture comme moyen de fabrication de climats contrôlés (Banham, 1969 ; Mandoul, 2012) et plus précisément pour ce qui nous intéresse ici, en tant que possibilité de fabriquer l'expérience du beau temps à demeure, comme une forme d'accomplissement d'un éternel été chez soi réalisant les conditions continues du bonheur idéalisé.

De même qu'il existe une fabrique du temps pour faire advenir les conditions météorologiques idéales pour une activité donnée (Tabeaud, 2017), pouvons-nous imaginer une fabrique du beau temps chez soi pour répondre aux impératifs de bien-être et de bonheur portés par nos sociétés ? Mais comment technologiser le beau temps ? Comment pouvons-nous aujourd'hui contrôler l'afflux de soleil permanent sur la Terre, le capter, le stocker sous forme de lumière, aussi bien que d'énergie, le détourner dans des réseaux qui le porteraient au-delà des façades, et le conduiraient dans les espaces profonds de la ville ? Les light-tubes et lumiducs inventés dans les années 1970 s'introduisent progressivement dans les bâtiments. Qu'en est-il de ces procédés techniques, de leurs performances, de leurs potentialités ? Si l'on ne peut capter et transporter le soleil à sa guise, ou si le soleil tant désiré n'est pas au rendez-vous de nos existences au moment et au lieu où sa présence nous semble nécessaire, se pourrait-il que nous puissions en recréer l'expérience, fabriquer le beau temps absent et nous apporter l'illusion du soleil ? Les technologies contemporaines d'éclairage ont considérablement évolué jusqu'à proposer aujourd'hui des lampes capables de reproduire l'intensité et la qualité de la lumière du jour. De nouveaux dispositifs complexes de fenêtres artificielles éclairantes ou de soleils artificiels, simulant le rayon directionnel éternel de l'été méditerranéen, sont proposés. Comment ce nouvel outillage technologique peut-il être mis à profit dans la perspective de la création de l'impression de beau temps chez soi ? Ces dispositifs techniques peuvent-ils constituer une solution à la problématique de la densification urbaine, comme l'imaginait l'artiste Guy Rottier au début des années 1970 ? Sont-ils une réponse à une demande diffuse pour une autonomisation des climats ? Offrent-ils une solution préventive aux injonctions liées aux carences d'accès au soleil naturel ? Sont-ils plus simplement une forme d'esthétisation d'un idéal moderne, une sorte d'assurance solaire face à l'adversité quotidienne ?

Ces questions multiples ont constitué la trame initiale de la recherche présentée dans ce rapport. Nous les avons organisées en trois grands axes d'investigation qui ont conditionné trois explorations parallèles.

Ces axes concernent successivement :

- **la perspective du conditionnement du rayonnement solaire, son transport et ses utilisations au-delà des façades** ; c'est la question qui constitue l'objet de la première partie de ce rapport où nous examinons l'imaginaire de la ville souterraine, les lumiducs et autres light-tubes, les nouveaux procédés de fibre optique ;
- **le développement de nouvelles formes de technologisation du beau temps** qui offrent la possibilité de fabriquer l'expérience du soleil chez soi, à volonté, hors de la nature, offrant des simulacres du beau temps tel qu'il est proposé par exemple dans des installations artistiques, des productions de designer, etc. ;
- **les dispositifs de simulation du rayonnement solaire pour la santé** impliquant notamment les lampes de luminothérapie.

Une nouvelle question de recherche est apparue au cours du travail. Elle a porté plus spécifiquement sur la perception des taches de soleil dans l'habitat. Nous l'avons développée à part et nous en avons finalement fait un objet de recherche en soi auquel nous dédions la troisième partie de ce rapport. Cette partie de la recherche met en évidence les effets et le pouvoir de la présence des taches de soleil dans la perception visuelle de l'environnement construit en s'appuyant sur un protocole d'enquête original.

Comment ce nouvel outillage technologique peut-il être mis à profit dans la perspective de la création de l'impression de beau temps chez soi ?

2. Approche méthodologique

Les différentes questions posées dans cette recherche exploratoire ont été développées à travers plusieurs stages de recherche menés par des étudiants de master accueillis dans notre laboratoire pour des périodes de trois à six mois chacun.

Le premier stage a été réalisé par Mohammed Attaoua au cours de l'année 2016, dans le cadre de son master Sciences et techniques des environnements urbains (école Centrale de Nantes et école nationale supérieure d'architecture de Nantes). Intitulé « **Lumiducs : histoire et enjeux dans la ville contemporaine** », le mémoire rédigé propose une analyse de l'imaginaire des dispositifs de conduite de la lumière naturelle dans l'environnement construit. Sur cette base, les enjeux des lumiducs dans l'urbanisme contemporain seront discutés en prenant en compte les possibilités techniques actuelles de ces dispositifs. La recherche s'est appuyée sur une revue de la littérature grise et des publications techniques spécialisées sur le sujet.

Le deuxième stage de recherche a été réalisé par Anna Ponizy au cours de l'année 2016 dans le cadre de son mémoire de fin d'études de l'école nationale des travaux publics de l'État (ENTPE, Lyon). Intitulé « **Suggestion de la lumière naturelle par des techniques d'éclairage artificiel : état des lieux et prospective** », le mémoire rédigé fait un état des lieux des dispositifs artificiels cherchant à reproduire certains aspects de la lumière naturelle, et étudie plus particulièrement les dispositifs permettant de simuler une tache solaire, afin de comprendre quels sont les critères liés à la vraisemblance de cette dernière. Une méthode originale d'analyse de la perception des effets des taches solaires dans les environnements habités a été développée. Elle a permis d'approfondir la recherche en questionnant la notion de beau temps et en obtenant des discours libres d'interviewés sur leur habitat.

Le troisième stage, de nature plus professionnelle, a été réalisé par Aurore Leloup au cours de l'année 2016 dans le cadre de son master Couleur, image, design à l'université Toulouse Jean Jaurès. Le rapport intitulé « **Les dispositifs de luminothérapie** », a permis de recenser et de caractériser un grand nombre de ces dispositifs tels qu'ils sont proposés à la vente pour les particuliers, puis d'analyser les pratiques de la luminothérapie chez soi à travers les commentaires en ligne des acheteurs de ces dispositifs sur les sites commerciaux.

Un quatrième stage de recherche, non prévu initialement, a été mené par Mélanie Richer dans le cadre de son master d'architecture à l'école nationale supérieure d'architecture de Nantes. Il a permis de mettre en œuvre une deuxième série d'enquêtes sur **la perception des taches solaires**, en utilisant la méthodologie développée par Anna Ponizy.

Enfin, des visites de dispositifs réels en situation (salons, showrooms, installations) ont contribué à alimenter la recherche, pour discuter les conséquences de l'avènement des dispositifs contemporains d'artificialisation du rayonnement solaire en matière d'évolution de l'habitat, et pour contribuer à nourrir le questionnement théorique initial sur une histoire culturelle de l'architecture au soleil.

3. Plan du rapport

Ce rapport est composé en trois parties qui peuvent s'aborder de manière autonome.

La première partie développe la question du captage, du transport et de la diffusion des flux lumineux dans les environnements construits. Nous montrons que cette question traverse l'Histoire et qu'elle prend progressivement corps dans le débat architectural et urbain à partir de la fin du 19^e siècle. Nous présentons les principaux jalons de cette Histoire, puis nous décrivons quelques aspects des dispositifs contemporains de transport et diffusion de la lumière naturelle. Cette partie constitue une synthèse du mémoire de Mohammed Attaoua.

La deuxième partie s'intéresse à la suggestion de la lumière naturelle par la maîtrise des effets lumineux, domaine exploré en particulier dans des installations artistiques mais aussi médicales. En créant des effets de leurre par l'immersion dans des conditions lumineuses particulières, ces installations révèlent les qualités spécifiques de la lumière naturelle. Nous présentons dans cette partie un ensemble de propositions d'artistes et de designers. Nous développons ensuite plus précisément les dispositifs qui simulent les effets de la lumière naturelle, notamment le dispositif CoeLux qui propose une expérience inédite du soleil et du ciel bleu. Enfin, nous analysons les effets des nouveaux dispositifs de luminothérapie chez soi. Cette partie est construite à partir des mémoires d'Anna Ponizy et Aurore Leloup.

La troisième partie de ce rapport est une étude empirique des effets des taches solaires dans l'environnement habité. Nous avons mis en place un dispositif expérimental permettant de comparer la qualification d'un ensemble d'images d'espaces domestiques ordinaires, avec et sans taches solaires. Nous montrons que la présence visuelle du soleil modifie de manière inconsciente l'appréciation que nous avons des espaces habités. Percevoir la présence du soleil, même sans en faire l'expérience, rend l'appréciation de l'espace plus positive sur de nombreux critères. Cette partie s'appuie sur le rapport de mémoire d'Anna Ponizy, complété par le travail d'enquête confié à Mélanie Richer.

Notes

1. Publié en ligne le 10/01/2018: 
<http://www.lavoixdunord.fr/294635/article/2018-01-10/le-record-de-1948-de-manque-de-soleil-en-janvier-sera-t-il-battu>
2. Publié en ligne le 12/01/2018: 
<http://www.lavoixdunord.fr/295828/article/2018-01-12/disparition-toujours-pas-de-preuve-de-vie-du-soleil>
3. La Voix du Nord, édition papier, 14 janvier 2018. 
4. Publié en ligne le 13/01/2018: 
<http://www.estrepublicain.fr/actualite/2018/01/13/dans-le-nord-on-n-a-pas-vu-le-soleil-depuis-66-jours>
5. Publié en ligne le 24/01/2018: 
<https://www.ladepeche.fr/article/2018/01/24/2728048-l-enseillement-en-baisse-rendez-nous-la-lumiere.html>
6. Publié en ligne le 19 janvier 2018: 
<https://www.theguardian.com/world/2018/jan/19/aint-no-sunshine-winter-darkest-europe>
7. Publié en ligne le 20/01/2018: 
https://www.francetvinfo.fr/meteo/inondations/la-france-en-manque-de-soleil_2571365.html
8. Publié en ligne le 18/01/2018: 
<http://www.leparisien.fr/societe/ville-par-ville-ou-le-soleil-manque-t-il-le-plus-en-france-18-01-2018-7508484.php>
9. Publié le 17/01/2018 et mis à jour le 01/02/2018: 
http://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/01/17/de-combien-d-heures-de-soleil-avez-vous-ete-privées-par-rapport-a-la-normale-en-decembre-2017_5242731_4355770.html
10. Publié en ligne le 12/01/2018, *op. cit.* 
11. Publié en ligne le 19/01/2018: 
<http://www.europe1.fr/sante/le-tres-faible-enseillement-nous-plombe-le-moral-3550427>
12. Publié en ligne le 21/01/2018: 
https://www.lamontagne.fr/clermont-ferrand/vie-pratique-consommation/sante/2018/01/21/nos-conseils-pour-vous-aider-a-faire-face-au-manque-de-soleil-en-auvergne-en-ce-debut-d-annee_12706972.html
13. In: « Le record de 1948 de manque de soleil en janvier sera-t-il battu ? », *op. cit.* 
14. Cf. Glossaire GéoConfluences: <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/sunbelt> 
15. Selon (Grapin, 2017): « *L'attractivité des façades atlantique et/ou méditerranéenne pourrait alors connaître un frein climatique, soit une inversion d'attractivité due au passage de l'héliotropisme positif, marqué par l'attirance vers le soleil, à un héliotropisme négatif, vers des lieux plus septentrionaux à l'écart de canicules répétitives* ». Il donne en exemple la façade atlantique. 
16. Cf. la célèbre chanson de Brigitte Bardot en 1966: « *Le soleil que c'est bon / Quand il vient / Me brûler la peau / Me brûler la peau / Me brûler la peau* ». Extrait de la chanson *Le soleil* de Brigitte Bardot, 1966, 45 Tours Vogue/Disc'AZ. Réf. J35110X45 
17. À partir des années 1980, le « trou dans la couche d'ozone » met en évidence les dangers des rayonnements solaires pour la vie sur Terre. 
18. Notamment à travers la question des îlots de chaleur urbains liés au piégeage radiatif du rayonnement solaire. 

A painting depicting the Crystal Palace at night. The structure's intricate iron and glass framework is illuminated from within, creating a warm glow. In the foreground, a large crowd of people in 19th-century attire is gathered. To the right, a large, ornate fountain with multiple tiers and water jets is brightly lit. The background shows a dark sky with a full moon and distant city lights.

**Il est possible de faire voyager
la lumière suivant un parcours
non rectiligne en suivant le jet
d'une fontaine d'eau.**

Capter, transporter, diffuser les flux lumineux

1. La recherche de maîtrise de la lumière naturelle à travers l'histoire

Les premières techniques de canalisation et de transport de la lumière naturelle mettent en œuvre des miroirs. On connaît les « miroirs ardents » qu'Archimède aurait imaginés pour brûler les navires romains lors du siège de Syracuse. Ce dispositif militaire fonctionne par la concentration du rayonnement solaire au moyen d'une parabole. Néanmoins, il est admis que *« 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). Il faut attendre les travaux d'Ibn Al-Haytham ou Alhazen (965-1040), un savant arabe du Moyen-Âge auteur d'un traité sur l'optique, pour que cette idée devienne réalité. Ce n'est qu'au 13^e siècle en Europe que fut construit pour la première fois un miroir ardent opérationnel, permettant de contrôler le flux lumineux provenant du soleil et de reproduire le résultat attendu par Archimède, comme l'illustre la figure ci-dessous dans le contexte militaire des croisades en Terre Sainte (Butti et Perlin, 1980).

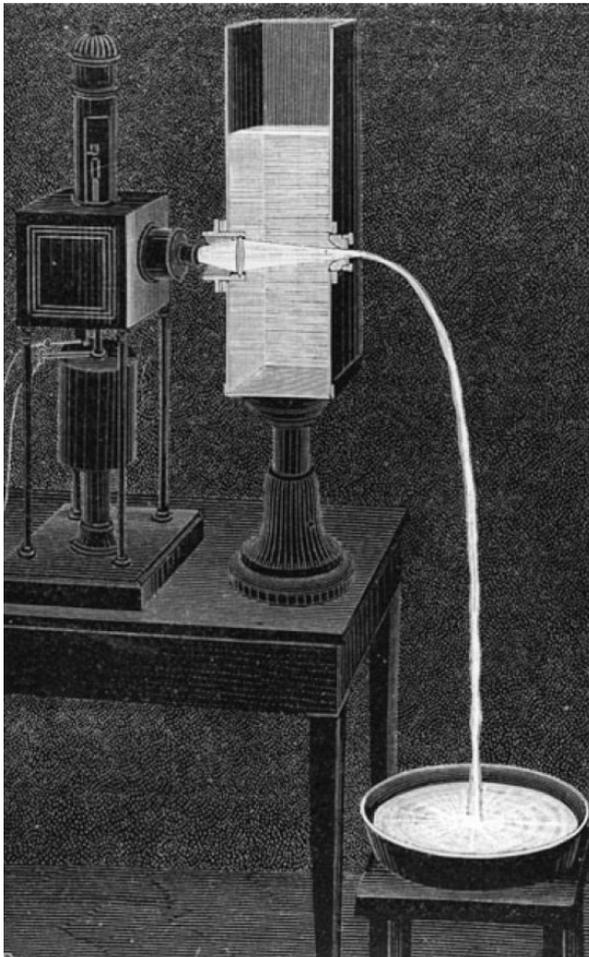


Miroir ardent d'Archimède, peint en 1600. Florence, Italie.

Crédits: Wikipédia

L'avancée scientifique suivante vient au milieu du 19^e siècle avec les travaux de Jacques Babinet (1794-1872), physicien français spécialiste d'optique, et Jean-Daniel Colladon (1802-1893), physicien suisse professeur à l'université de Genève. Ceux-ci montrent qu'il est possible de faire voyager la lumière suivant un parcours non rectiligne en suivant le jet d'une fontaine d'eau (Johnston, 2004). Pour ce faire, ils exploitent le principe physique dit de « réflexion interne totale » qui permet de guider le flux lumineux par réflexions successives sur les gouttelettes formant le jet d'eau (Colladon, 1842). Ces principes seront mis en œuvre dans des spectacles et dans les célèbres fontaines lumineuses des expositions universelles de la fin du 19^e siècle, notamment à Paris en 1889.

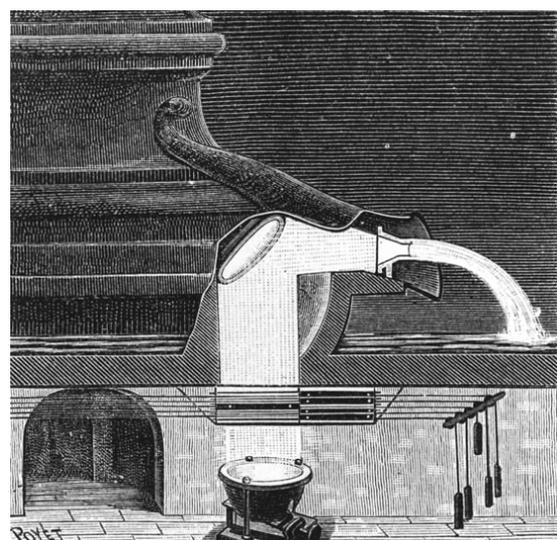
De manière plus générale, les observations sur le déplacement de la lumière dans un milieu canalisé, mèneront plus tard à l'invention de la fibre optique et à ses applications dans les domaines des télécommunications et de la santé. (Hecht, 1984)



Dessin de la fontaine lumineuse de Colladon, 1841.
(*La Nature*, 2^e semestre 1884, p. 325)



Fontaines lumineuses de l'Exposition universelle de Paris 1889. (*Musée Carnavalet, Paris*)



Coupe sur une fontaine lumineuse de l'exposition de Paris 1889. (Hecht, 1984)

Une étape importante dans la maîtrise du flux lumineux du soleil est liée à l'invention et au perfectionnement de l'héliostat au cours du 19^e siècle. L'héliostat est un système de miroirs montés sur un socle rotatif, capable de suivre le déplacement du soleil afin de capter le maximum de son rayonnement tout au long de la journée.

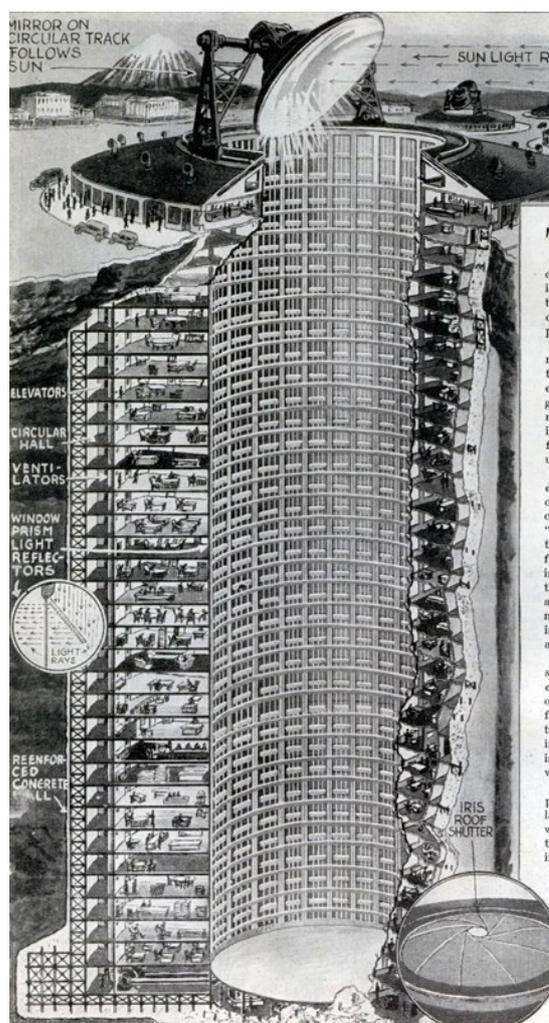
Le premier modèle pratique est inventé en 1827. Jean Thibault Silbermann (1806-1865), physicien français, présente à l'Académie des Sciences en 1843 l'héliostat qui va porter son nom. L'héliostat de Silbermann assurait l'éclairage continu tant recherché dans les expériences d'optique. Il est resté le modèle le plus abouti et le plus précis jusqu'à la fin du 19^e siècle. Posé sur trois pieds en guise de cales, il est constitué d'une horloge et d'un miroir pouvant être programmé pour une latitude donnée pour suivre la course du soleil.



L'héliostat de Silbermann.

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

Une application spectaculaire du principe de l'héliostat sera proposée dans un projet urbain japonais utopique du début des années 1930. Suite au tremblement de terre de 1923 à Tokyo, des ingénieurs japonais émettent l'hypothèse que les espaces en sous-sols présentent moins de vulnérabilité aux mouvements sismiques. Le projet de gratte-ciel inversé de 35 étages enterrés, dénommé *Depthscaper*, suit ce principe. Avec un seul niveau laissé au-dessus du sol, des ouvertures sont installées pour pomper l'air et l'acheminer vers les appartements. Pour l'éclairage, le projet propose un gigantesque héliostat de 75 pieds (23 mètres) de diamètre qui réfléchirait la lumière du soleil dans les espaces profonds. Des verres prismatiques installés sur les parois intérieures des appartements, terminent d'acheminer la lumière vers les lieux de vie. Ce projet préfigure le développement de l'urbanisme souterrain dans la seconde moitié du 20^e siècle.

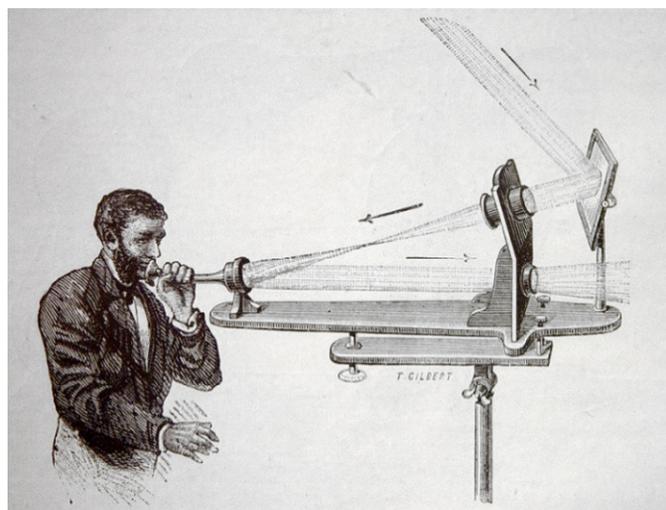


Depthscaper.

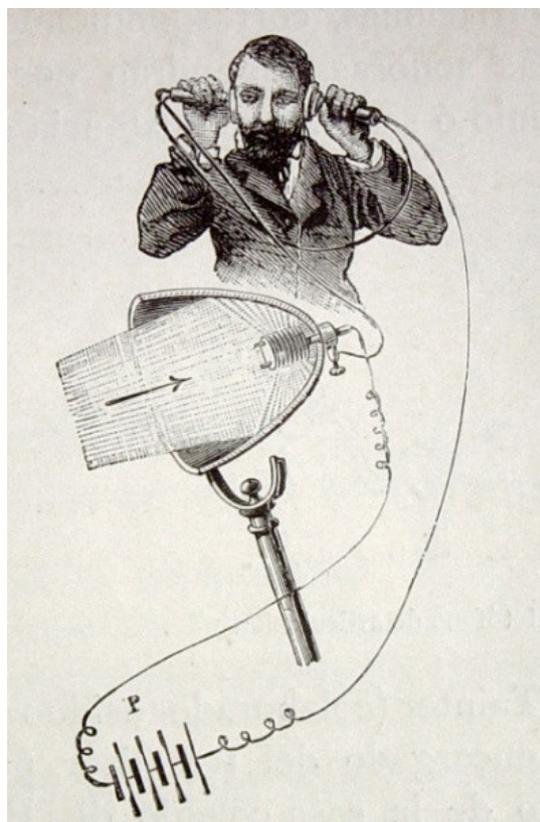
Everyday Science and Mechanics Magazine, nov. 1931. (ESMM, 1931)

Une curiosité scientifique liée à la recherche de techniques de transport de la lumière est le « photophone » imaginé par l'ingénieur anglo-canadien Graham Bell (1847-1922), connu comme l'inventeur du téléphone en 1876. Peu satisfait du signal transporté par les câbles, Bell avait alors pensé à un chemin qui ne dépendait pas des obstacles physiques : la lumière (Hecht, 1999). En 1880, il propose un appareil de transport du signal sonore par modulation du flux lumineux. L'appareil consistait en un premier miroir réfléchissant le rayonnement solaire sur un autre miroir relié à un tube duquel provient la voix d'une personne. Entre les deux, une lentille est placée pour collimater, c'est-à-dire diriger de manière parallèle, les rayons lumineux transmis. Le flux lumineux modulé est concentré au cœur de la parabole sur une cellule de silicium, 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 200 mètres. Cependant, la technique reste dépendante de l'état du climat et des obstacles entre les réflecteurs et les récepteurs. Bell, en décrivant la scène à son père 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 et j'ai même aperçu par mes oreilles le passage d'un nuage le long du disque du soleil. »*



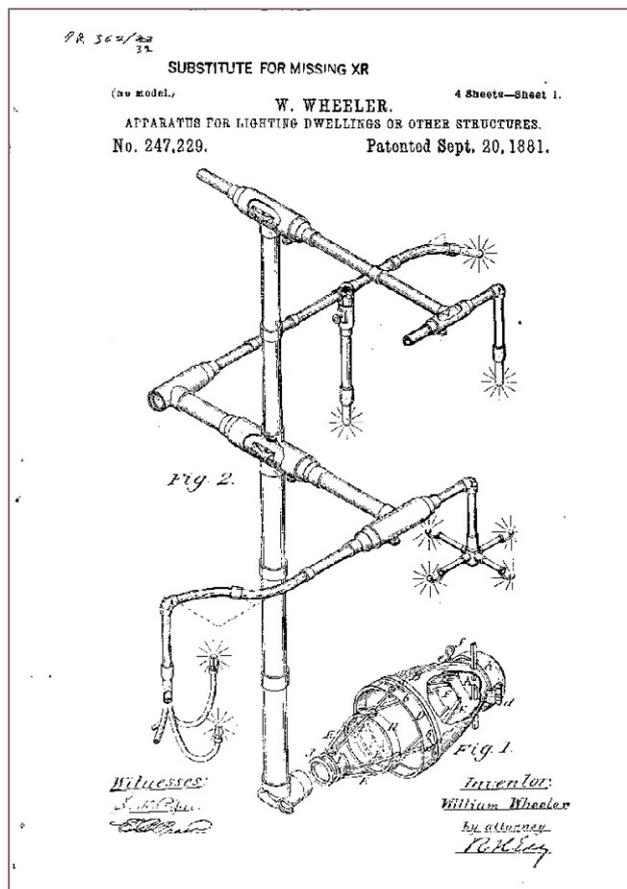
Le premier système de transport de la lumière spécifiquement destiné à l'habitation est proposé par l'ingénieur américain William Wheeler (1851-1932). Dans les années 1880, Wheeler cherche à résoudre le problème du transport de lumière à l'intérieur des maisons, exactement de la même manière que le gaz ou l'eau (Hecht, 1984). Il dépose le brevet d'un modèle qu'il nomme « appareil d'éclairage des maisons et d'autres structures ». Wheeler explique dans son brevet que la lumière qu'il souhaite transporter dans des tubes est générée par des 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 pour utiliser la lumière naturelle. Les tubes qu'il décrit sont faits de verre dont les parois sont couvertes à l'extérieur par un film argenté et une couche d'asphalte pour prévenir les égratignures et le ternissement. Il prévoit des lentilles dans le tube et des verres en oblique dans les coudes de manière à réfléchir le rayon rectiligne, à optimiser le transfert et à minimiser les pertes d'efficacité à mi-chemin.



Le photophone d'Alexander Graham Bell.

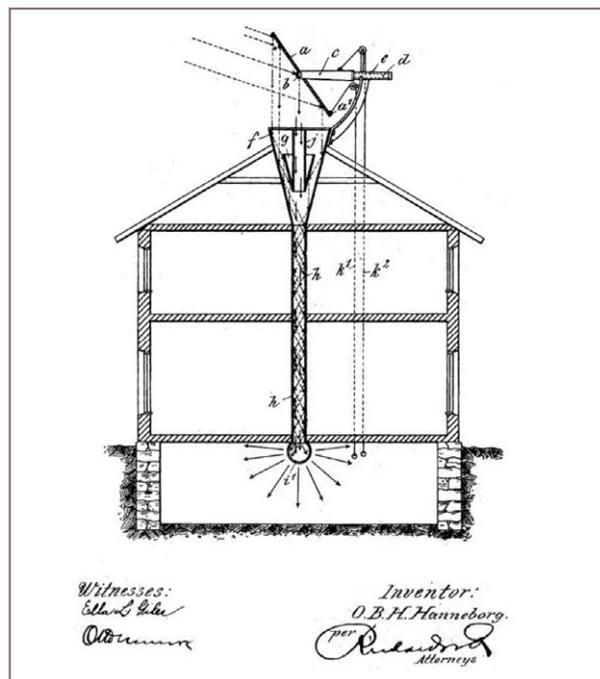
Crédits : up-magazine.info

Nous pouvons penser que la découverte de l'ampoule électrique, un an plus tôt en 1879 par Thomas Edison, a contribué à faire oublier cette invention, même si nous pouvons la considérer comme à l'origine de l'idée de lumiduc. En effet, l'ampoule électrique allait devenir une solution beaucoup plus efficace pour l'éclairage des espaces intérieurs.



Appareil de conduite de lumière à l'intérieur d'une maison à deux étages. (Wheeler, 1881)

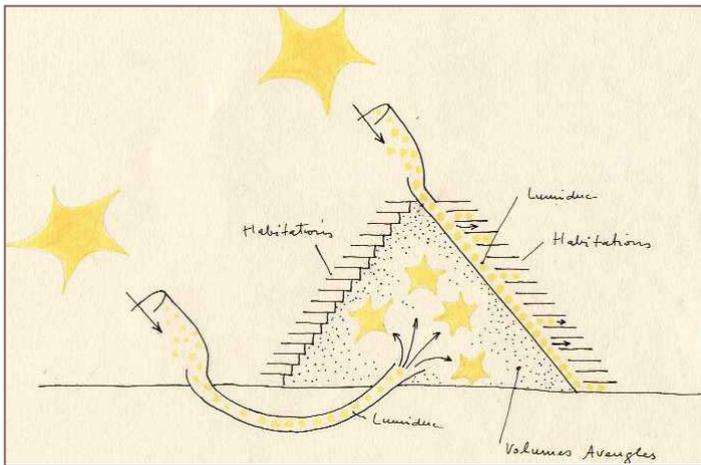
Un autre inventeur, O.B.H. Hanneborg (1861-1919) originaire de Christiania (actuellement Oslo) en Norvège, décrit en 1890 un système voisin de celui de Wheeler mais basé sur la lumière naturelle. Hanneborg propose de collecter la lumière du soleil et de la transporter vers les espaces profonds des habitations, en utilisant un système composé d'un héliostat manuel, d'un tube creux pour la réflexion de la lumière et d'un diffuseur (Hanneborg, 1901). Il en dépose le brevet en 1900 et l'obtient en 1901. 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.



Appareil de transport de lumière solaire dans le bâtiment par Hanneborg. (Hanneborg, 1901)

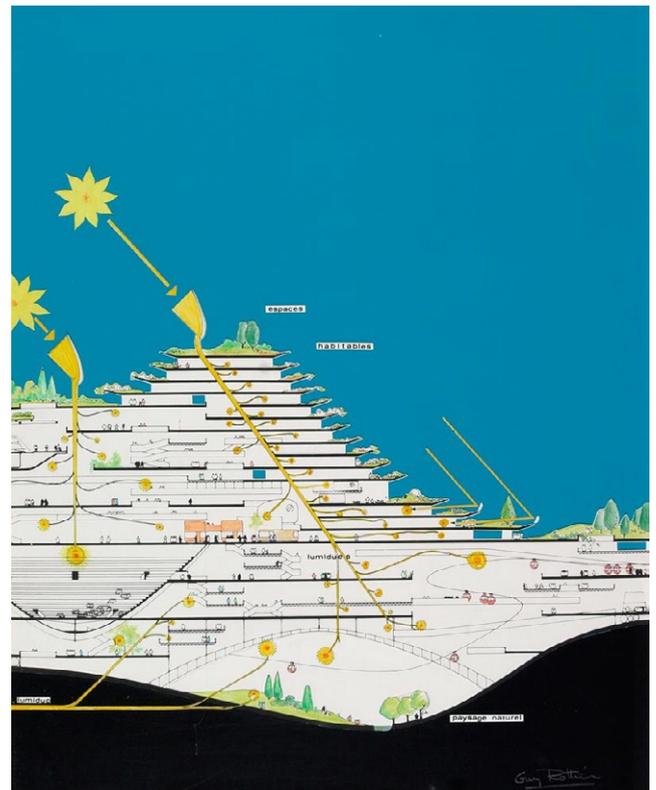
Comme celle de Wheeler, cette méthode de captage du rayonnement est restée à l'écart des préoccupations de son époque. Cela s'explique à la fois par le faible rendement lumineux de ces solutions, et par l'effervescence des découvertes liées à l'éclairage artificiel électrique et à décharge gazeuse, aux supposées vertus thérapeutiques. La question du transport de la lumière naturelle est ainsi éludée durant une grande partie du 20^e siècle.

Une combinaison des systèmes de Wheeler et Hanneborg apparaît cependant dans les années 1970, à l'occasion des débuts des préoccupations écologiques urbaines. L'architecte et artiste Guy Rottier mobilise la question des lumiducs comme solution centrale de son utopie urbaine Ecopolis, ville semi-enterrée permettant de préserver la surface de la Terre de la pollution urbaine humaine. Comme Hanneborg, Rottier cherche à capter et à transporter la lumière du soleil à l'intérieur des espaces habités. Comme Wheeler, il imagine un vaste système de lumiducs qui conduisent la lumière captée vers les « robinets à soleil » installés dans les lieux souterrains. Rottier s'appuie sur les travaux de l'hélio-physicien Maurice Touchais, inventeur d'un capteur solaire à la fin des années 1960, et imagine un système de transport de la lumière dans de larges tuyaux creux à réflexion spéculaire.



Principe de l'Écopolis de Guy Rottier.

Coupe sur l'Écopolis de Guy Rottier.



Le point de diffusion de la lumière étant séparé de celui de captage, Ecopolis ouvre la porte à des formes urbaines en rupture avec les formes traditionnelles. Rottier écrit ainsi : « 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).

À la fin des années 1980, l'anthropologue Colette Pétonnet publie un article où elle s'interroge sur la notion de temps présent (Pétonnet, 1989). Elle donne raison aux intuitions de Rottier. En effet, 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... », 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 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 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 ». Ces arguments rejoignent ceux défendus par Michel Ragon décrivant l'Écopolis de Rottier : « il n'y a plus de nord, de sud, d'est ou d'ouest. Nous pouvons éclairer des locaux aveugles. Et c'est la révolution, car dans nos plans nous ne tiendrons plus compte de l'orientation, étant sûrs que nous serons toujours satisfaits » (Ragon, 1973).

D'autres auteurs, notamment de science-fiction, ont décrit des univers incluant l'avènement des principes du lumiduc. Citons Michel Jeury (1923-2015), dont le roman *La vallée du temps profond* (Jeury, 2007) met en scène une ville souterraine du futur en temps de guerre, une situation qui a poussé ses habitants à se réfugier sous terre pour se protéger des menaces nucléaires. La ville souterraine de Jeury est une structure urbaine qui possède les paramètres d'une ville de surface. Il décrit des formes connues, comme une place de village où un figuier jette de l'ombre grâce au lumiduc qui transporte la lumière du soleil. 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 à celle de la surface.

La réalité reste encore cependant loin de cette vision utopique.

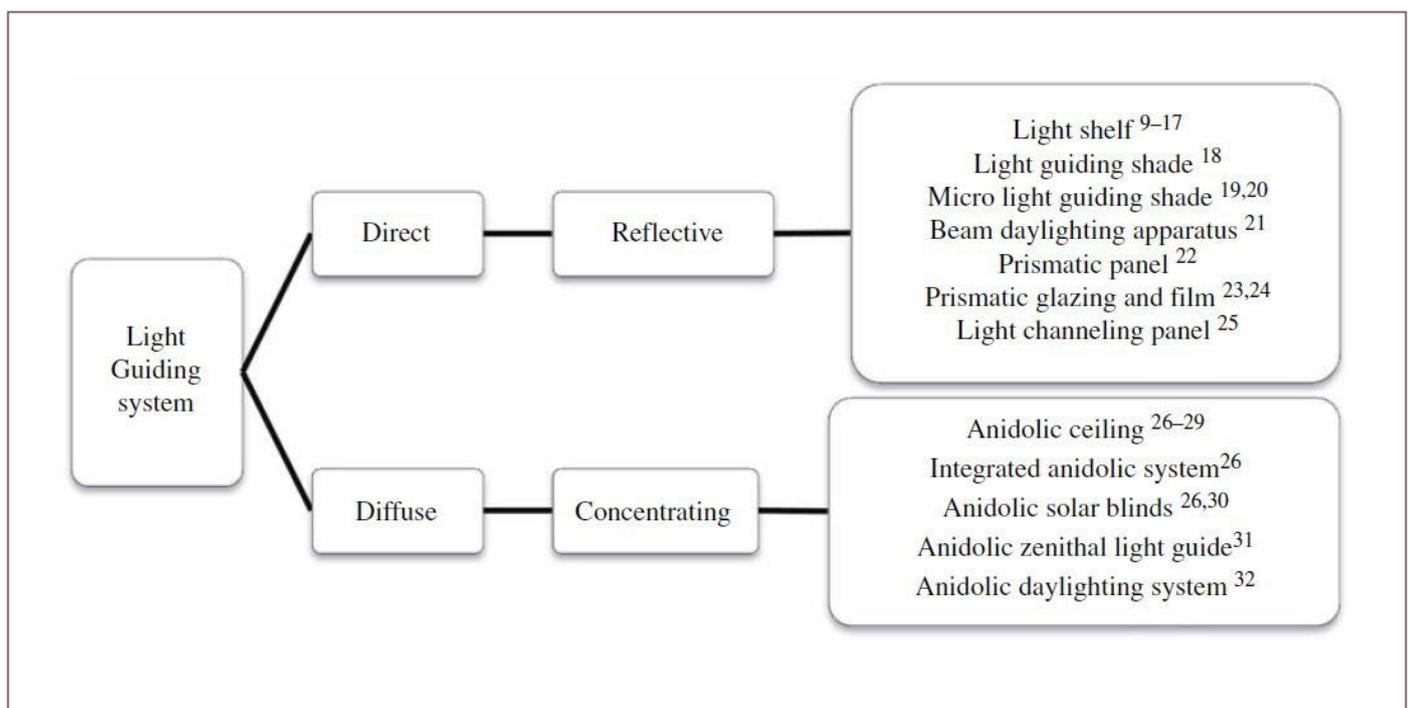
2. Le lumiduc contemporain

Définitions

Nous englobons sous le terme lumiduc tous les dispositifs linéaires de canalisation de la lumière permettant d'éclairer les espaces profonds. Ils comprennent trois composantes principales : un capteur placé à l'extérieur, un tube canalisateur et un diffuseur à l'extrémité intérieure (Carter, 2014 ; Carter *et al.*, 2009). Le terme français lumiduc n'est pas très répandu, les publications scientifiques en anglais utilisent les termes *Daylight Guiding System* (système de guidage de la lumière naturelle), *Tubular Daylight Guidance System* (système tubulaire de conduction de la lumière du jour), *Light transport system* (système de transport de la lumière), *Light wells* (puits de lumière), *Light pipes* (tube de lumière), *Hollow Light Guide* (tube de lumière creux) ou *Solar Light Pipe* (tube de lumière solaire).

Parmi ces dispositifs, le *Light pipe* ou *Mirrored light pipe* (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 Guy Rottier. Il est aussi le plus étudié jusqu'à ce jour (Baroncini *et al.*, 2010).

Classement des *Light Guiding Systems* selon Nair.
(Nair *et al.*, 2013)



Le premier composant du lumiduc est le capteur qui collecte la lumière naturelle depuis la source directe du soleil et de la voûte céleste. La performance du capteur et le type de ciel permettent de déterminer le taux de lumière naturelle disponible à transporter (Baroncini *et al.*, 2010). Les capteurs sont installés à l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment, sur le toit ou sur la façade (Kwok, 2011). 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). Tous les capteurs transmettent un spectre de lumière visible sans rayons infra-rouges et avec moins de rayons ultra-violets (Maxey *et al.*, 2008). Ainsi, contrairement aux dispositifs traditionnels comme les fenêtres, les lumiducs permettent l'éclairage par la lumière naturelle sans apport de chaleur.

Nous distinguons deux types de capteurs : les capteurs passifs sont statiques et leur forme et disposition sont définies de manière à collecter le maximum de lumière directe et diffuse en journée ; les capteurs actifs sont des héliostats qui assurent le maximum de captage du rayonnement solaire direct par leur mobilité. Ils sont plus efficaces mais exigent également une maintenance plus importante en raison de leur motorisation.



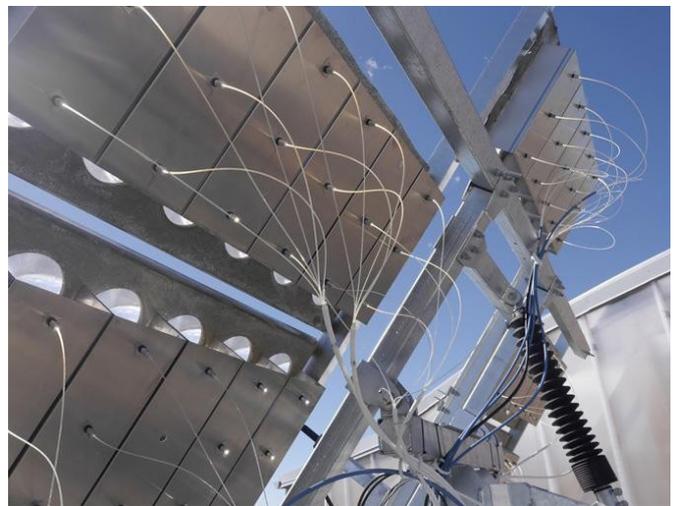
▲ Capteur de conduit de lumière prismatique. Héliobus.

Crédits : Heliobus.com



Le second composant du lumiduc est le tube, relié au capteur solaire, et dont le rôle est de canaliser la lumière naturelle collectée vers les espaces profonds. De section circulaire ou carré, le tube est caractérisé par le matériau qui le compose. Il peut atteindre plus de 95% de taux de réflectivité lorsqu'il s'agit de parois métalliques (Rosemann *et al.*, 2008). Il peut être fait en verre prismatique, en 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'obtenir une lumière collimatée (Nair *et al.*, 2013).

Le tube est rigide ou souple, ce qui influe directement sur la quantité de lumière transmise. Sa longueur peut aller de 1,5 mètre jusqu'à 200 mètres avec la fibre optique et les tunnels de lumière. Cette capacité maximale est communiquée par la société japonaise Himawari. Les longueurs de 10 à 25 mètres sont plus courantes et varient selon le phénomène optique utilisé pour canaliser la lumière, le matériau dont est fabriqué l'intérieur du tube et la capacité du capteur à collecter la lumière directe (Zhang *et al.*, 2002).

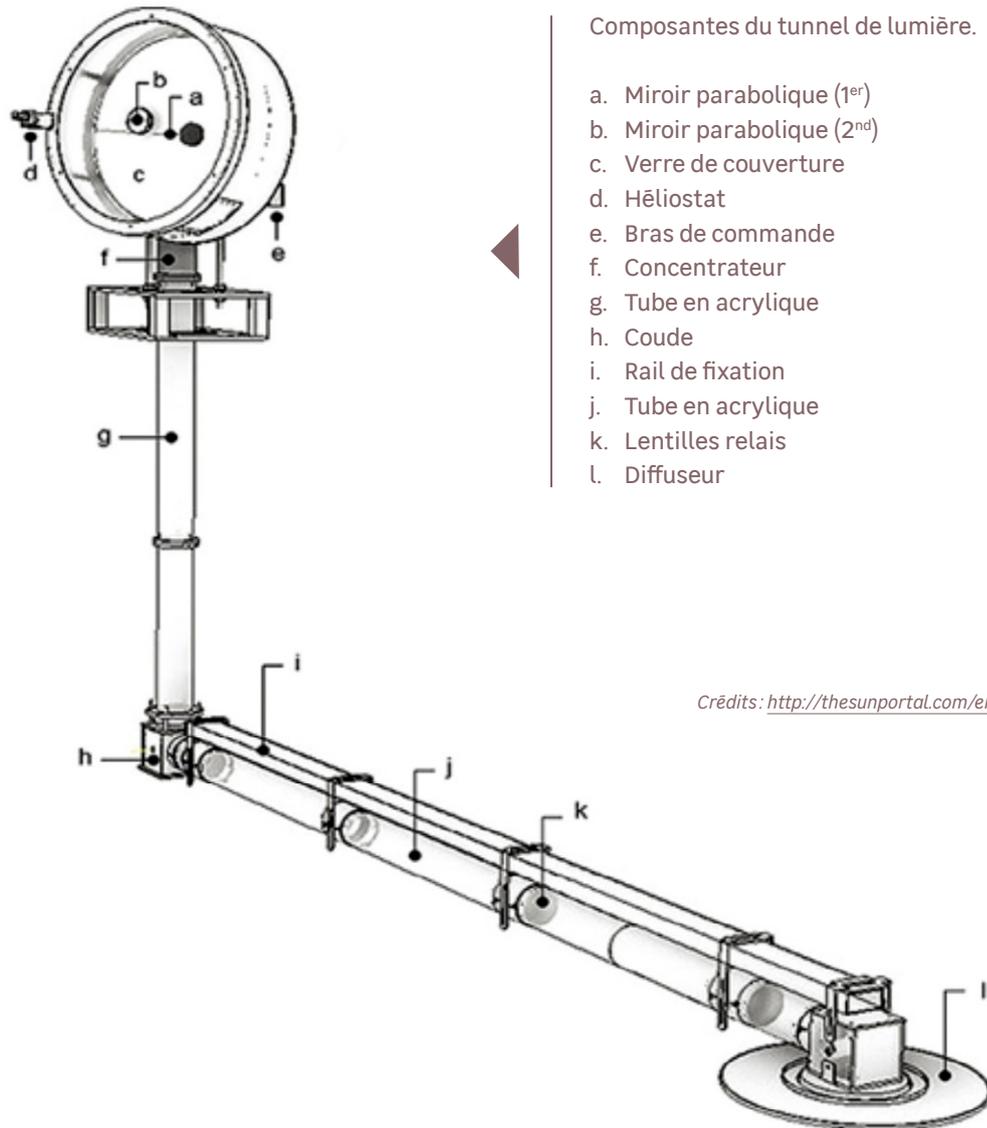


▲ Tubes de fibres optiques Echy.

Crédits : Batirama.com

▲ Capteur d'un lumiduc à tube solide (fibre optique).

Crédits : Parans.com



Composantes du tunnel de lumière.

- a. Miroir parabolique (1^{er})
- 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

Crédits : http://thesunportal.com/eng/?page_id=98

Enfin, **le dernier composant du lumiduc est le diffuseur.** C'est la partie qui permet à la lumière transportée d'être délivrée à l'intérieur de l'espace. La lumière diffusée peut être exclusivement naturelle, ou hybride lorsque des sources de lumière artificielle sont ajoutées au système, notamment pour réguler les variations de luminosité (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). 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.

Par ailleurs, le tube du lumiduc peut être fait de manière à transmettre la lumière sur sa longueur. Le nombre de diffuseurs montés sur le tube varie selon le besoin de chaque espace, on parle alors d'extraction de lumière (Garcia-Hansen, 2006). La diffusion peut être ponctuelle, par une succession d'extracteurs (diffuseurs), ou bien linéaire à travers le tube-diffuseur transparent lui-même.

Types de lumiducs et fabricants



Lumiduc prismatique, James Carpenter,
Washington DC, USA.

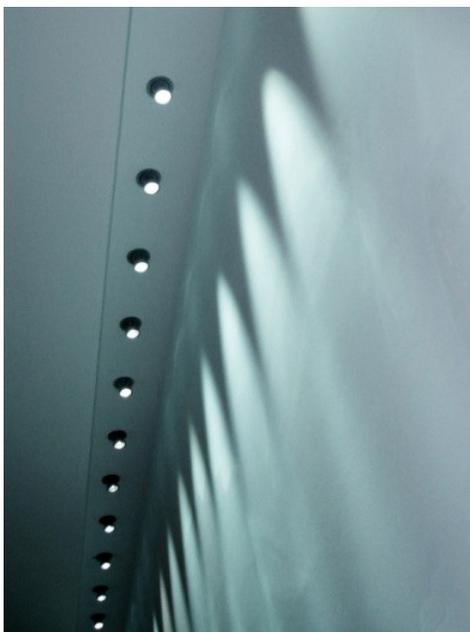
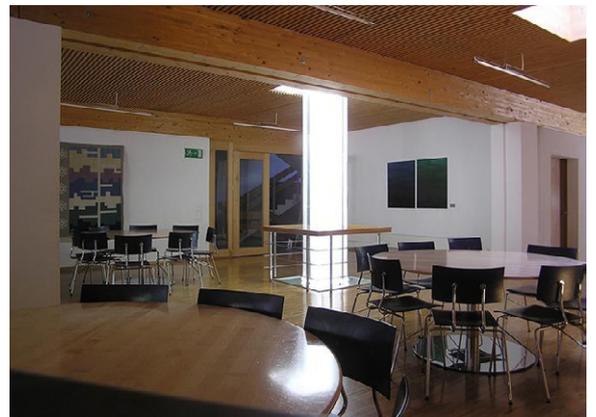
Crédits: carpenterlowings.com/portfolio_page/solar-light-pipe

À partir des matériaux mis en œuvre et du phénomène optique qui sert à transporter la lumière, nous distinguons trois types de lumiducs. Nous reprenons ici la classification de Derlande *et al.* (2015) :

- **les conduits de lumière** transportent la lumière par multi-réflexion spéculaire. Ils possèdent une section 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. L'avantage des conduits de lumière à corps creux transparents est leur capacité à assurer transport et diffusion en même temps, avec une répartition uniforme du niveau d'éclairage intérieur. Les caractéristiques du matériau permettent de retrouver des solutions aux espaces profonds. Ils ont néanmoins l'inconvénient de l'intégration plus difficile dans la forme architecturale traditionnelle ;
- **les lumiducs à fibres optiques** ou à tiges lumineuses, utilisent le principe de réflexion interne totale pour canaliser la lumière. La fibre optique est composée de deux parties : un cœur qui transporte la lumière et une couche externe qui empêche les pertes de lumière. Son efficacité est grande. Contrairement aux conduits de lumière, elle dépend seulement de la longueur et non du diamètre du tube. Le diamètre de la fibre est compris entre 50 et 150 micromètres. Plusieurs fils peuvent être regroupés pour faire un seul câble de 10 millimètres ;
- **les tunnels de lumière** transportent une lumière collimatée grâce à un alignement de lentilles de Fresnel convergentes le long du tube diffuseur (Garcia-Hansen *et al.*, 2003). Leur principal inconvénient est la difficulté de montage et de maintenance.

Suivant ce classement des types de lumiducs, nous distinguons les fabricants suivants :

- **conduits de lumière** (*mirrored light pipes* et *prismatic light pipes*) : Solatube, Monodraught, Lightway, Velux, Heliobus, Sundolier ;
- **lumiducs à fibres optiques** : les plus célèbres sont le fabricant japonais Himawari, le fabricant suédois Parans et plus récemment la start-up française Echy ;
- **tunnels de lumière** : il s'agit du lumiduc le plus sophistiqué ce qui peut expliquer sa rareté sur le marché. Il existe à notre connaissance un seul fabricant, le coréen Sunportal dont la technologie est utilisée dans le jardin souterrain du projet Lowline à New York.



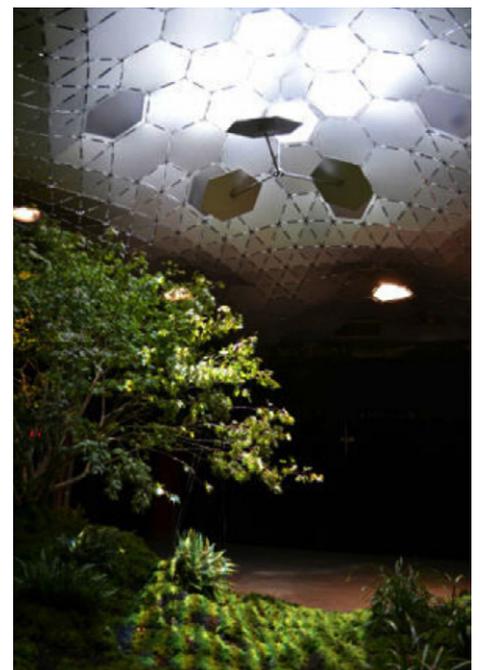
Diffusion par spots des lumiducs à fibres optiques.

Crédits: Parans.com



Canopée du projet Lowline à New-York.

Crédits: thelowline.org



Efficacité lumineuse du lumiduc

Par principe, les lumiducs fonctionnent mieux avec un flux solaire important. Ceci réduit leurs usages dans les pays à hautes latitudes. Parmi les lumiducs proposés par les fabricants de conduits de lumière 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).

Les performances de lumiducs annoncées par les fabricants sont indiquées dans les figures ci-après. Les indicateurs utilisés varient selon les fabricants et selon les techniques utilisées pour conduire la lumière. Il peut s'agir du niveau d'éclairage (en lux) en fonction du diamètre du dispositif et du type de climat lumineux (temps clair, couvert, etc.), de la surface potentiellement éclairée par le dispositif, de l'efficacité lumineuse en fonction de la longueur du tube, ou encore du flux lumineux transmis à différentes distances des diffuseurs.

| 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 |

Performance des conduits de lumière métalliques Lightway.

Crédits : lightway.com

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 |

Performance des conduits de lumière métalliques Solatube.

Crédits : solatube.com

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) |

Performance des conduits de lumière métalliques Monodraught.

Crédits: monodraught.com

| Nombre de modules | ECHYhome | | 4 modules | | 10 modules | |
|----------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Version du produit | 2015 | 2017 | 2015 | 2017 | 2015 |
| 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.

Performance des conduits de lumière métalliques Echy.

Crédits: echy.fr

| 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.

Performance des conduits de lumière métalliques Himawari.

Crédits: Himawari-net.co.jp

Ambiance lumineuse associée au lumiduc

La principale difficulté posée par ce type de dispositif d'éclairage est l'absence de vue sur l'extérieur. Dans une étude comparative de huit bâtiments de bureaux 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 des 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 (2006) a fait ressortir des réponses unanimes, montrant 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 vue, même si le lumiduc permettait de transmettre les effets lumineux extérieurs 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. Plus encore, l'absence de fenêtre influence négativement la perception de la lumière provenant du conduit de lumière. Selon Carter *et al.* (2009), elle est parfois même perçue comme une lumière électrique. Ce dernier ajoute que le conduit de lumière n'améliore pas l'ambiance quand la fenêtre est absente.

Intérêt énergétique du lumiduc

L'étude menée par Carter *et al.* (2009) sur des bâtiments en Grande Bretagne montre que la contribution du *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. Nous manquons cependant de données pour établir précisément l'intérêt du lumiduc sur la consommation énergétique liée à l'éclairage, notamment dans les espaces de travail.

Le conduit de lumière n'améliore pas l'ambiance quand la fenêtre est absente.

3. Éléments de discussion

La maîtrise de la lumière naturelle et du rayonnement solaire sont des thématiques récurrentes de l'imaginaire architectural et urbain à travers l'Histoire. Les différentes utopies d'habitat souterrain, motivées par des raisons sismiques, écologiques ou sécuritaires, font l'hypothèse d'une maîtrise parfaite des principes de captage, concentration, transport et diffusion à volonté de la lumière naturelle. Celle-ci est alors conditionnée comme le sont l'air, l'eau, les flux hygrométriques, les sons, etc. de nos environnements quotidiens.

Ces systèmes existent désormais sous des formes diverses, depuis le simple puits de lumière jusqu'aux systèmes optiques les plus élaborés. Leur éventuel développement pose de nombreuses questions sur l'évolution de l'habitat (dissociation de la lumière et de la vue, dissociation de l'éclairage naturel et des saisons), sur l'évolution urbaine (possibilité de concentration d'habitat, disparition potentielle de la rue en tant que pourvoyeuse de lumière naturelle) et sur les modes de vie résultants. Nous sommes encore très loin de telles perspectives. Néanmoins, certaines situations urbaines contemporaines, soumises à une inflation des valeurs foncières, laissent imaginer le développement de tels systèmes, par exemple dans les « maisons iceberg » – maisons agrandies en sous-sol parfois sur plusieurs niveaux – apparues à Londres à la fin des années 2000 en réponse aux contraintes réglementaires interdisant l'extension en hauteur. Par sa capacité à laisser se développer de fortes densités construites et humaines, le lumiduc pourrait également être discuté comme une réponse aux problématiques contemporaines d'étalement urbain. La ville ultra dense est-elle rendue plus vivable avec un système comme le lumiduc ? Voilà une question qui mériterait d'être discutée sur des bases expérimentales.

En termes d'architecture et d'ambiances lumineuses, le lumiduc pose la question de la dissociation de la lumière et de la vue, de l'éclairage naturel et des saisons. Nous pouvons penser que cette évolution technique va dans le sens d'un conditionnement et d'un cloisonnement de plus en plus fort des espaces habités. La question de la vue et du rapport aux saisons pourrait trouver des solutions dans les écrans multiples qui peuplent nos quotidiens. Dans cette hypothèse, l'artificialisation totale de nos habitats serait devenue réalité.

La ville ultra dense est-elle rendue plus vivable avec un système comme le lumiduc ?



**Le soleil nous touche en effet
par ses effleurements et ses caresses
sur la peau, mais aussi par ses coups
et ses brûlures...**

Simuler l'expérience de la lumière naturelle

1. L'expérience du soleil

L'expérience du soleil interroge le sens de la vue par sa dimension lumineuse, mais elle relève aussi du sens du toucher par son aspect radiatif. Le soleil nous touche en effet par ses effleurements et ses caresses sur la peau, mais aussi par ses coups et ses brûlures, la chaleur qu'il transmet et les éblouissements qu'il provoque, sa capacité à nous assommer littéralement parfois. Les conditions créées par son absence nous touchent également : enveloppement de l'ombre d'une ruelle méditerranéenne en été, ou bien irritation piquante des recoins d'une place sans soleil en hiver (Siret, 2013).





La vie des êtres humains s'adapte aux cycles journaliers et saisonniers du soleil. Nos systèmes physiologiques sont en phase avec les rythmes diurnes de la lumière du jour, en particulier nos cycles veille-sommeil appelés rythmes circadiens. La lumière naturelle joue ainsi un rôle essentiel dans la synchronisation des cycles biologiques avec les cycles sociaux. Bien que l'éclairage électrique nous permette de modifier nos périodes d'activité, les recherches montrent que le travail de nuit reste difficile et entraîne souvent somnolence, troubles du sommeil, troubles de l'humeur et difficultés cognitives accrues au travail (Golden *et al.*, 2005). En outre, ce lien bio-social à la lumière est à l'origine des troubles affectifs saisonniers, modifiant notre humeur et nos réponses émotionnelles (Heerwagen, 1990).

Dans un monde fortement urbanisé, la lumière naturelle implique un rapport fort à la nature car elle change de manière significative au long de la journée, fournissant un indicateur temporel précieux. De même, nous sommes sensibles aux changements de couleur et d'intensité de la lumière produits par les conditions météorologiques variables (Orlans et Heerwagen, 1992).

L'expérience du soleil agit de ce fait sur la façon d'organiser notre environnement immédiat. Notre rapport au soleil et les manières de composer les lieux de la vie quotidienne interrogent les habitants dans leurs pensées, leurs sentiments et leurs actions spécifiques, comme laisser entrer la lumière du jour chez soi, éviter les reflets du soleil, voir le lever ou le coucher du soleil depuis la fenêtre, ou encore sentir la chaleur par une fenêtre ensoleillée (Hauge, 2015).

La lumière naturelle a également une valeur symbolique qui projette notre corps loin de son environnement immédiat. Elle nous donne à ressentir le ciel lui-même et évoque le cosmos, le monde de l'au-delà, du divin. Le culte du soleil est présent dans de nombreuses sociétés, comme les cultures grecque, romaine, égyptienne ou amérindienne. On retrouvera plus tard un lien entre les dimensions mystique et fonctionnelle de la lumière du soleil dans les approches hygiénistes à partir du 19^e siècle (Boubekri, 2008). Les cures de lumière par Arnold Rikli dès 1855 ou l'héliothérapie d'Hermann Brehmer mettent en avant les vertus curatives de l'exposition du corps à la lumière. La « prière de lumière » par Hugo Höppener (alias Fidus) en 1894 est l'exemple d'une approche quasi religieuse de vénération du soleil. Le soleil curatif de l'hygiénisme de la fin du 19^e siècle et du début du 20^e siècle donnera lieu à un hédonisme solaire caractéristique des années 1950 à 1970 (Siret, 2013). Au-delà des aspects physiques du rayonnement solaire (lumière et chaleur), le soleil de cette période présente de multiples connotations culturelles : *« la chaleur nous promet le bien-être, elle annonce la liberté et le plaisir de la nudité permise [...] la lumière, elle, nous laisse prévoir la splendeur d'un ciel pur, l'éclat des paysages et des choses à voir »* (Laurent, 1967, p. 41). Le soleil est devenu aujourd'hui un gage fort de bien-être, d'équilibre personnel et même de santé mentale.

Le lien bio-social à la lumière est à l'origine des troubles affectifs saisonniers, modifiant notre humeur et nos réponses émotionnelles.



2. Installations artistiques

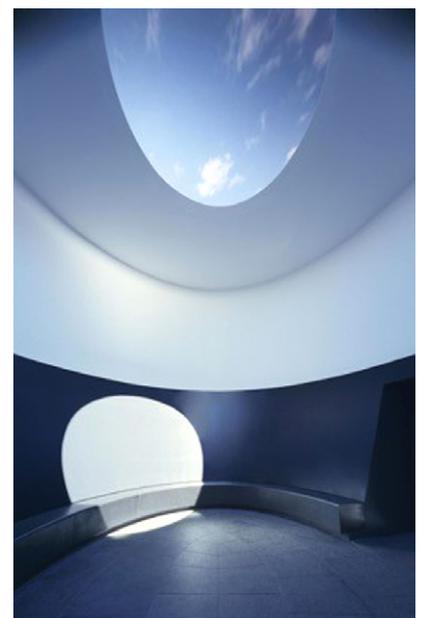
Ces dimensions sont mobilisées lorsque nous nous exposons au rayonnement solaire, créant une expérience porteuse d'émotions. En s'appuyant sur ce ressort de mobilisation des émotions, de nombreux artistes ont cherché à produire dans leurs installations un effet de leurre en sculptant la lumière naturelle ou en suggérant une ou plusieurs de ses qualités. La maîtrise des paramètres lumineux et de la mise en scène des dispositifs d'éclairage immerge les visiteurs dans des conditions lumineuses particulières qui interpellent leur ressenti.

Les exemples présentés ci-après montrent des créations lumineuses provenant du monde de l'art ou du design qui recréent et manipulent de manière ponctuelle les émotions produites chez l'observateur par la lumière du soleil.

Sculptures de lumière

James Turrell est un artiste américain dont la matière première est la lumière, naturelle ou artificielle. Par la maîtrise des conditions lumineuses, il crée des scènes qui perturbent notre perception visuelle, de telle sorte que le visiteur n'a plus de repères dans l'espace : l'espace est dénué d'objets, seule la lumière semble l'habiter. De fines découpes dans les murs, sols et plafonds sculptent la lumière afin d'en contrôler l'entrée et la diffusion. Sculpter la lumière et les ombres pour analyser leurs incidences sur notre rapport à l'espace constitue l'axe principal du travail de cet artiste.

Débutée dans les années 1970, la série de travaux appelés *Skyspaces* traduit l'objectif de l'artiste de sensibiliser le spectateur aux effets dynamiques de la lumière sur la toile de fond que constitue le ciel. Ces œuvres consistent à réaliser une ouverture permettant de voir le ciel mais en supprimant l'impression de profondeur grâce à un éclairage artificiel réglable. Le regard du spectateur est ainsi dirigé vers la voûte céleste tout en donnant l'impression de voir un tableau, immobile dans un temps court mais dynamique sur un temps long. Des bancs installés en périphérie de la pièce invitent



▲ Deux installations de James Turrell : *Knight Rise*, 2001 et *The Color Inside*, 2013. ▲

Crédits : Sean Deckert et Florian Holzherr



le visiteur à s'asseoir et à prendre le temps de la découverte. Seule l'éventuelle tache lumineuse projetée en cas de beau temps donne un indice sur sa réalité. L'expérience contemplative proposée n'est jamais reproduite deux fois compte tenu des conditions changeantes du ciel pour marquer la dimension dynamique du temps qui passe et par extension, la relation de l'homme au monde, au cosmos. Il définit ses œuvres comme des lieux de rencontre entre le ciel et la Terre.

The Weather Project.

Crédits : Studio Olafur Eliasson, 2003. <http://olafureliasson.net>



Permanence d'un moment lumineux

Dans le cadre des *Unilever Series* pour le Turbine Hall de la Tate Gallery de Londres, l'artiste danois Olafur Eliasson a reproduit en 2003, dans cet énorme espace d'exposition, un coucher de soleil artificiel. Cette installation suspend la course du soleil au moment du coucher et prolonge pendant les six mois de l'exposition cet instant du quotidien. Intitulée *The Weather Project*, l'installation cherche à nous interroger sur le rôle de la météo et du climat dans notre quotidien.

Le dispositif s'appuie sur trois principes de mise en scène pour produire cette illusion : un écran semi-circulaire, un plafond-miroir et un brouillard artificiel. Au fond de la salle se trouve un faux soleil produit grâce à un écran semi-circulaire rétroéclairé par environ deux cents ampoules à mono-fréquence. Généralement utilisées pour l'éclairage public, ces ampoules émettent de la lumière à une fréquence si étroite que les couleurs autres que le jaune et le noir deviennent invisibles, ce qui transforme le champ visuel de l'espace en paysage bicolore. La moitié supérieure du soleil est le reflet de l'écran semi-circulaire dans le plafond-miroir, produisant une sphère éblouissante. Le plafond est composé de plaques d'aluminium recouvertes avec un film-miroir. Ce deuxième dispositif réfléchit, en plus de l'écran semi-circulaire, l'ensemble de l'espace du hall, doublant visuellement son volume. Enfin, l'installation se complète d'une brume artificielle projetée depuis l'entrée de la salle, comme si elle venait de l'extérieur, pour troubler la vision et accentuer l'effet visuel flou de phénomène naturel. En parcourant l'installation jusqu'au fond de la salle, les visiteurs peuvent découvrir son montage et comprendre les ressources techniques fabriquant cette ambiance si particulière de soleil couchant.





Accélération de la course du soleil

En 2003, l'artiste russe Vadim Fishkin et l'éclairagiste A.J. Weissbard ont recréé dans une salle fermée et en vitesse accélérée (2h30) l'expérience lumineuse de la course du soleil au long d'une journée. Cette installation intitulée *A Speedy Day* propose une mise en scène rappelant celles de James Turrell, mais construite entièrement avec des dispositifs d'éclairage et des écrans. Les concepteurs créent une fausse fenêtre sur un mur de la salle à l'aide de deux dispositifs permettant de suggérer le contact avec l'extérieur : d'une part, un écran rétroéclairé montre une vue lointaine du ciel extérieur et, d'autre part, un système dissimulé de projecteurs projette une tache lumineuse correspondant, en inclinaison et en couleur, au faisceau solaire d'un moment déterminé de la journée. Cette mise en scène s'accompagne d'une horloge installée sur le mur qui révèle cette accélération du temps solaire.



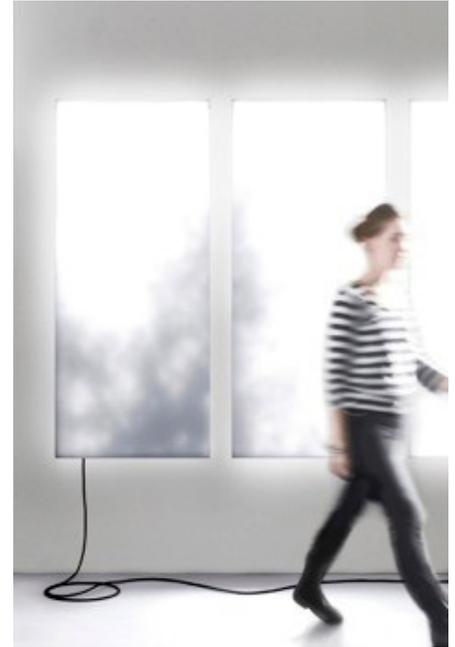
Suggestion d'une source lumineuse extérieure

L'artiste norvégien Daniel Rybakken a travaillé sur la suggestion du rapport à l'extérieur en mobilisant notre perception subconsciente de la lumière du jour. Son installation *Daylight Comes Sideways* (2007) cherche à nous questionner sur la manière avec laquelle la lumière modifie notre rapport à l'extérieur. L'artiste présente une scénographie dans une pièce d'une maison conventionnelle éclairée par deux types de lampe alternativement : un plafonnier sphérique conventionnel avec une ampoule à incandescence, et une fausse fenêtre rétroéclairée suggérant une lumière extérieure. Afin de créer l'illusion de la lumière naturelle, Rybakken construit une surface éclairante avec 1100 LEDs grand-angle qu'il place derrière une surface acrylique semi-transparente. Ce type de LED incorpore une lentille qui réfracte la lumière et homogénéise l'intensité depuis tous les angles de vue. De plus, un système de programmation simple règle finement l'intensité lumineuse des LEDs de manière centralisée, ce qui permet de créer des chorégraphies lumineuses recréant l'ombre de végétaux bougeant au gré du vent derrière la fenêtre. Les panneaux sont mis en scène derrière un voilage et une menuiserie qui augmentent le réalisme de l'ensemble. Surface éclairante et mise en scène produisent une sensation de lumière diffuse extérieure pénétrant dans la pièce.



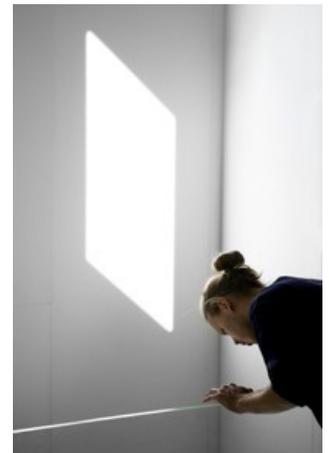
A Speedy Day, Salone del Mobile à Milan 2003.

Crédits : Tilde de Tullio (Change Performing Arts)
<http://www.ajweissbard.com/a-speedy-day>



Daylight Comes Sideways. Crédits : Daniel Rybakken (<http://www.danielrybakken.com>)

En 2010, Rybakken insère son travail de suggestion de la lumière naturelle directement dans le projet d'aménagement intérieur d'une entrée d'un immeuble de bureaux à Stockholm (Suède). L'artiste expose son installation le long des trois étages d'une cage d'escalier aveugle ouverte sur le hall d'entrée du bâtiment. Il crée un ensemble de taches solaires artificielles qui serviront à éclairer l'espace et à suggérer la présence de fenêtres donnant sur l'extérieur. Ces taches solaires sont en réalité des panneaux en forme de losange rétroéclairés par environ 6 000 LEDs à grand-angle. Grâce à la forme et au fort contraste lumineux, l'artiste donne l'illusion d'une tache lumineuse produite par un rayon de soleil entrant par une fenêtre invisible pour le spectateur.



Daylight Entrance, 2010.
Crédits : <http://www.danielrybakken.com>

Effets inconscients de la lumière

En 2008, Rybakken continue à explorer les effets inconscients de la suggestion de la lumière naturelle en créant une petite tache solaire intégrée sous un bureau domestique. La source lumineuse étant en réalité à l'intérieur du meuble, la présence de la tache de lumière dont la couleur et la forme rappellent une tache solaire, suggère une connexion à l'extérieur et interpelle nos souvenirs de journées ensoleillées.

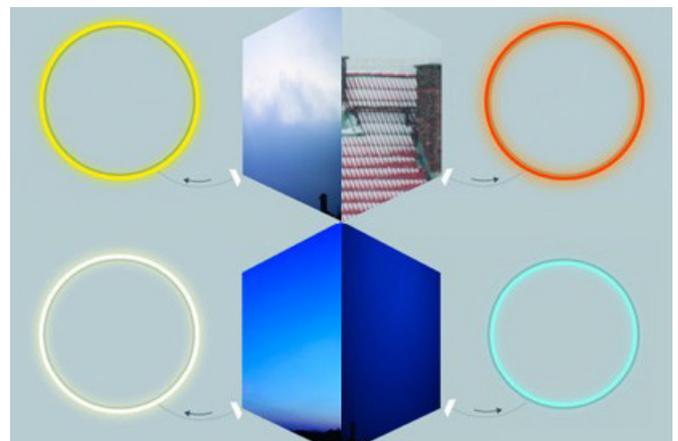


Subconscious Effect of Daylight.

Crédits : Daniel Rybakken, 2008

La lumière diffuse, sans rayon de soleil direct, peut parfois être qualifiée de morne ou terne et donc générer des émotions négatives. La designer Marina Mellado a imaginé un dispositif appelé *Luz*, récompensé au Lexus Design Award 2015, qui permet de recréer une ambiance lumineuse agréable, même par mauvais temps.

Le dispositif se présente sous la forme d'une lampe circulaire d'un mètre de diamètre, connectée à un capteur qui mesure la luminosité et la température de couleur extérieures. En cas de temps extérieur nuageux, par exemple, la lampe prendra une couleur plus chaude avec une forte luminosité afin de simuler la lumière du soleil. *Luz* permet ainsi de pallier les émotions négatives qui peuvent être ressenties lorsque la météo est nuageuse.



▲ Dispositif *Luz*. Crédits : Marina Mellado (<http://luz.marinamellado.com>) ▲

Vadim Fishkin interroge également le pouvoir de suggestion de la lumière naturelle avec son installation *Choose Your Day* en 2005. Placé dans une salle d'exposition aveugle, le visiteur interagit avec une télécommande lui permettant de choisir un climat personnalisé, grâce à un système de contrôle de la lumière et du son en plus d'une projection du ciel.

Fishkin cherche ainsi à construire des moments lumineux naturels personnalisés selon l'état d'esprit du visiteur, de manière artificielle.



▲ *Choose Your Day*. Crédits : Vadim Fishkin (<http://www.vadimfishkin.si>) ▲

**...construire des moments lumineux
naturels personnalisés selon l'état d'esprit
du visiteur, de manière artificielle.**



3. Dispositifs d'éclairage

Nous avons élaboré un état des lieux des dispositifs d'éclairage cherchant à reproduire les qualités de la lumière du jour. Il existe de nombreuses différences parmi les multiples systèmes relevés. Les caractéristiques de la lumière du jour étant nombreuses, il semble ardu de créer un dispositif artificiel les simulant toutes. De ce fait, les différents dispositifs existants se focalisent le plus souvent sur un ou deux aspects particuliers de la lumière extérieure qu'ils tentent de reproduire le mieux possible.

Les dispositifs d'éclairage actuels peuvent ainsi se rapprocher de la lumière naturelle en recréant sa composition spectrale. Au moyen de la technologie LED et des ampoules connectées, certains dispositifs permettent de simuler la dynamique variable de la lumière en réglant finement la couleur et l'intensité selon les cycles lumineux du soleil. D'autres dispositifs, de type écran, sont capables de reproduire le ciel et le paysage extérieur, à la manière d'une fenêtre. Enfin, une autre gamme de dispositifs vise à reproduire les effets physiologiques de la lumière naturelle comme les lampes de luminothérapie abordées dans la partie suivante.

Nous pouvons supposer que plus un dispositif reproduit de caractéristiques de la lumière du jour, plus il fait illusion. Nous parlons ici de l'illusion au sens visuel et perceptif du terme et non de l'illusion au sens physique et des bienfaits que peut apporter par exemple la luminothérapie. En ce sens, une ampoule à lumière du jour aura beau reproduire le cycle naturel de la lumière extérieure et être une juste reconstitution technique de la lumière naturelle, la vision de l'ampoule ne donnera pas l'illusion d'un soleil.

De même, une fausse fenêtre pourra nous faire croire à une lumière provenant de l'extérieur mais le manque de variabilité de cette dernière ainsi que le peu de données distrayantes fournies ne nous leurreront pas longtemps sur la véracité du dispositif. Ainsi, nous pouvons nous interroger sur l'illusion produite par les différents dispositifs cherchant à reproduire la lumière naturelle. Créer artificiellement une source de lumière du jour, qui puisse faire illusion de son authenticité quel que soit le temps pendant lequel on la regarde, est-ce possible aujourd'hui ?

Par la suite, nous décrivons différents dispositifs selon leur mode de reproduction de la lumière naturelle. Nous distinguons trois catégories : les **dispositifs de simulation physique**, les **dispositifs de simulation physiologique des effets de la lumière naturelle**, et les **dispositifs de suggestion intégrant une mise en scène lumineuse**. De nombreux dispositifs ne se limitent pas à une seule catégorie.

La vue du ciel et le contact du patient avec la nature contribuent à son bien-être.

Dispositifs de simulation physique de la lumière

La lumière étant un phénomène complexe, les simulations numériques ne permettent pas toujours d'obtenir une reproduction parfaite. Afin d'avoir une meilleure idée de l'impact de la lumière extérieure sur l'intérieur du bâtiment, des systèmes visant à recréer le ciel ont été imaginés, dans lesquels les architectes peuvent par exemple placer leurs maquettes. Ces dispositifs permettent, à une moindre échelle, de simuler la lumière naturelle par des dispositifs d'éclairage artificiel afin d'analyser les ambiances lumineuses créées au sein d'un bâtiment étudié, sous un ciel stable, et permettant ainsi de réaliser de nombreuses mesures indépendamment de la météo extérieure, ou encore de visualiser des effets lumineux complexes.

De manière succincte, nous pouvons repérer trois types de dispositifs. En premier lieu, les ciels artificiels essaient de recréer par différentes approches la distribution des luminances de la voûte céleste. Composé d'un ensemble de lampes et/ou miroirs, le ciel artificiel permet de simuler une lumière diffuse dans des conditions de ciel couvert. Le déplacement du soleil est réalisé en plaçant la maquette sur une table tournante correspondant à toutes les positions.

En deuxième lieu, les soleils artificiels, couplés ou non aux dispositifs précédents, simulent l'influence des rayons solaires directs. Un soleil artificiel est recréé grâce à une source lumineuse fixe, qui émet un flux lumineux parallèle, pour imiter les rayons du soleil. Enfin, les soleils mécaniques simulent en plus la course complète du soleil pendant une journée, pour une localisation et une date précises, en faisant varier la position de la source lumineuse et non de la maquette.



Ciel artificiel (en haut),
soleil artificiel (milieu)
et soleil mécanique (en bas).

Crédits : www.cstc.be

Dispositifs de simulation physiologique des effets de la lumière naturelle

Les liens entre certains troubles de la santé et l'exposition à la lumière, et plus particulièrement à une lumière d'une forte intensité, étant prouvés scientifiquement, des dispositifs sont utilisés comme outils médicaux pour leurs effets bénéfiques. C'est le cas par exemple de la luminothérapie. D'autre part, il a été montré que la vue du ciel et le contact du patient avec la nature contribuent à son bien-être. Certains fabricants proposent donc des dispositifs offrant des alternatives aux pièces aveugles ou peu éclairées.

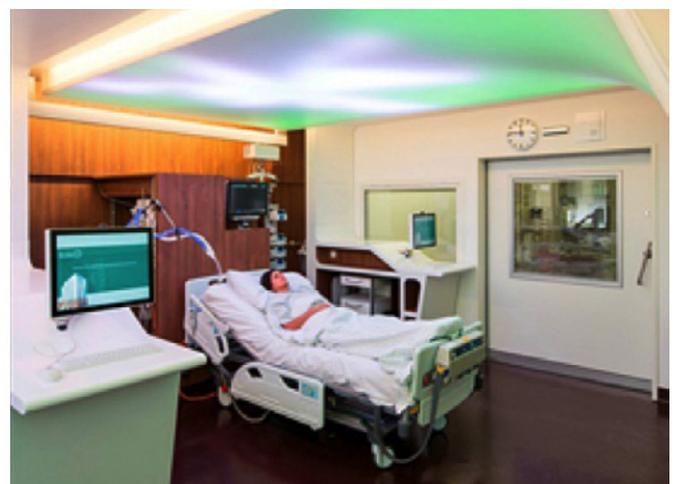
Dispositifs à usages médicaux

Dans les hôpitaux, certains patients peuvent rester alités pendant de longues périodes. Si les chambres présentent en général des ouvertures sur l'extérieur, c'est rarement le cas pour les salles plus spécialisées qui doivent la plupart du temps être stérilisées et sont donc complètement fermées. Dans les années 1970, les travaux de Wilson déterminaient déjà que les patients en soins intensifs dans des chambres avec fenêtres guérissaient plus rapidement que les patients dans des chambres sans fenêtres (Wilson, 1972). Des études postérieures trouveront des résultats similaires, s'accordant à dire que la lenteur de la guérison dans les chambres sans fenêtres était due au manque de stimulation et d'informations climatique et temporelle provenant de l'extérieur.

Ce principe est aujourd'hui la base de dispositifs de reproduction de la lumière à des fins médicales. Mis en place dans les salles sans fenêtres des hôpitaux, ils simulent un lien à l'extérieur qui vise à rassurer et calmer les patients pour permettre une meilleure guérison.

C'est le cas du plafond lumineux (*Luminous Ceiling*) développé par Philips. Il s'agit d'un dispositif qui permet de contrôler l'atmosphère des chambres d'hôpitaux afin de pouvoir améliorer la santé des patients. Mis en place dans la clinique de la Charité à Berlin, il imite le cycle naturel journalier grâce aux 15 400 LED qui le composent. Une partie de ces LED sont des LED à couleurs de température blanche qui peuvent par ailleurs imiter la lumière venant d'un ciel clair d'été.

Les résultats montrent que le stress et l'anxiété des patients dans les chambres avec ces types de dispositifs ont diminué, alors que leur humeur et leur qualité de sommeil ont été améliorées. De plus, il est apparu que le personnel médical encadrant se sentait également plus calme, ce qui avait un effet positif sur les patients.



Luminous Ceiling Philips. Crédits : www.philips.com

Un dispositif à visée similaire, mais de nature plus ponctuelle, a également été mis en place dans les centres IRM par Imedco. Il s'agit dans ce cas d'écrans LED qui projettent une lumière blanche dans la pièce. Il est également possible de choisir une image de fond sur l'écran. Les images extérieures relaxantes aident en effet à distraire les patients de leur traitement et peuvent aussi calmer les patients claustrophobes. Comme l'accès aux salles IRM pour les patients est ponctuel, l'idée de cycle journalier n'est pas présente et l'objectif principal du dispositif se limite à la réduction du stress et de l'anxiété des patients.

Dans le même ordre d'idées, Lumick crée des fenêtres virtuelles grâce à une association de panneaux lumineux LED de 43 mm, qui diffusent une lumière de forte intensité similaire à la lumière du jour, ainsi qu'une photo haute définition imprimée sur un polymère thermoplastique, ce dernier permettant à la lumière de se diffuser de manière homogène sur l'ensemble de la photographie.

Ces deux projets se focalisent donc chacun sur un aspect différent des caractéristiques de la lumière naturelle. En effet, le plafond lumineux de Philips se concentre davantage sur la reproduction de données temporelles alors que la LED *Virtual Light Window* d'Imedco essaie davantage de recréer la stimulation due à la vue d'un paysage extérieur.



▲ Dispositifs *LED Virtual Light Window* (gauche) et *Lumick* (droite). ▲

Crédits : www.imedco.com et www.lumick.fr

Le projet *Demain est un autre jour* du designer Mathieu Lehanneur se concentre sur la sensation d'une météo changeante. Cette œuvre a été installée en 2012 dans l'unité de soins palliatifs du groupe hospitalier Diaconesses Croix Saint-Simon à Paris, et il permet aux patients de voir le ciel du lendemain, selon un lieu choisi par leurs soins. La démarche ici est davantage psychologique, voire spirituelle. Le dispositif se présente sous la forme d'une sorte de hublot qui donne une vision impressionniste du ciel. Grâce à une connexion internet, la fenêtre collecte en effet les prévisions météorologiques du lieu choisi par le patient et les retranscrit sur son écran un jour plus tôt.



▲ *Demain est un autre jour.*

Crédits : Mathieu Lehanneur

Dispositifs de confort et productivité

Les ambiances des lieux de travail et de formation ont fait l'objet d'expérimentations du point de vue de l'éclairage, l'objectif étant d'augmenter la productivité et le confort des travailleurs ou étudiants. Dans ce cadre, Philips a imaginé un système appelé *School Vision*, qui permet de favoriser l'apprentissage des enfants à l'école. Ce système permet

aux enseignants d'adapter le type de lumière selon l'activité exercées avec leurs élèves : une lumière plus chaude et d'intensité moins élevée, comme en fin de journée, sera favorable à la lecture alors qu'une lumière plus froide et plus intense, comme en milieu de journée, sera plus propice à la concentration.

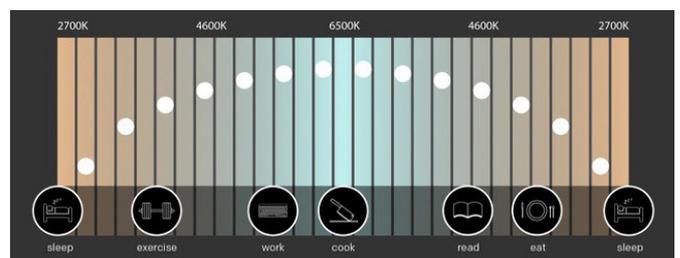


School Vision Philips.

Crédits : www.lighting.philips.com

Dispositifs dynamiques temporels

Avec les progrès de la technologie LED et de la régulation à distance ou automatisée, des entreprises imaginent des nouveaux systèmes de couplage entre la lumière naturelle et l'éclairage intérieur. Prenons par exemple l'ampoule Silk conçue par Saffron, qui permet d'ajuster automatiquement sa température de couleur et son intensité lumineuse au cours de la journée. Cette ampoule intelligente connectée à un smartphone utilise deux types de LED (2700 K et 6500 K) afin de créer toutes les nuances de température de couleur. Ainsi, elle offre une lumière adaptée aux différentes activités journalières (dormir, se réveiller, travailler, cuisiner, lire, etc.). D'autres fabricants proposent des ampoules aux effets similaires telles l'ampoule Hue de Philips ou l'ampoule Lixf.



Ampoule intelligente Silk.

Crédits : <http://seesaffron.com/silklight>

Pour atténuer les effets néfastes des décalages horaires sur l'organisme, Philips a travaillé sur un concept de fenêtre artificielle interactive, appelée *Daylight Window*. Les possibilités de cette fenêtre sont variées: personnaliser l'ambiance lumineuse de la pièce à sa guise, changer la vue extérieure, programmer un réveil en douceur ou encore s'installer sur le rebord de la fenêtre afin de profiter d'une lumière bleue revitalisante permettant de compenser

les effets de fatigue liés au vol. Il est également possible de recréer les différents moments de la journée, non pas selon leur temporalité classique, mais pour cibler leurs effets sur l'organisme de façon plus ponctuelle. De cette manière, on ne cherche plus réellement à recréer ou faire illusion de la lumière du jour, mais à utiliser cette dernière pour des besoins précis.



Daylight Window, Project Philips.

Crédits : www.philips.com

Cette approche de personnalisation des ambiances avec une logique de simulation de la lumière naturelle est aussi la base d'un projet d'Artemide en 2008. Mis au point par le scénographe Luca Ronconi, ce dispositif appelé *La Stanza del Maestro* (soit littéralement « la chambre du maître ») consiste en une pièce aux murs et sol blancs, dans laquelle

se trouvent uniquement un lit, une table et une lampe de chevet, ainsi qu'une fenêtre artificielle. L'ensemble ainsi créé permet de faire varier les ambiances pour retranscrire un cycle journalier complet. Cependant, même si cette fenêtre présente des données temporelles artificielles, elle ne permet pas de faire varier les conditions météorologiques.



La Stanza del Maestro, Artemide.

Crédits : www.artemide.com

Dispositifs distractifs

Une fenêtre doit nous permettre, en premier lieu, de bénéficier d'un apport de lumière. Cependant, la fenêtre ouvre également notre intérieur sur le monde alentour. C'est la limite entre ces deux espaces, et nous nous attendons donc implicitement à percevoir des données informatives sur cet extérieur. Ainsi, pour recréer la sensation d'ouverture au plafond ou sur les murs, certains fabricants proposent des écrans LED dans lesquels se trouvent des images présentant la nature, le ciel, etc. Dans son étude de 1967, Makus détermine que les vues extérieures qui présentent des paysages à longue et moyenne distance sont plus appréciées que celles à courte distance (Makus, 1967). De plus, les vues extérieures présentant des éléments naturels sont également préférées aux autres.

L'entreprise Sky Factory propose d'installer un écran LCD rétroéclairé par des LED. De cette manière, la fenêtre artificielle ne présente plus seulement un paysage fixe mais un extérieur en mouvement. Notons que les scènes filmées ne durent en moyenne que 1h15, elles ne permettent donc pas d'obtenir des données informatives qui reflètent l'heure de la journée. Cependant, ce type de dispositif permet de simuler des données distractives tel le mouvement de l'eau ou des nuages.

Il existe également des fenêtres interactives, imaginées par Rational Craft. Ces dernières cadrent une image diffusée sur un écran plasma haute définition. Grâce à un capteur et une connexion wifi, le logiciel associé à la fenêtre artificielle est capable de corriger l'image en fonction de la position d'une personne dans la pièce. L'image est donc adaptée en fonction des déplacements de l'utilisateur, afin de s'ajuster à la perception qu'il aurait de la vue extérieure. Le défaut de ce dispositif est qu'à partir de plusieurs utilisateurs, c'est-à-dire plusieurs personnes qui regardent la fenêtre et non plusieurs personnes qui se trouvent dans la pièce, l'image ne peut plus s'ajuster. Cependant, ce dispositif est l'un des rares à ne pas se focaliser sur la simulation de l'extérieur, mais également sur la perception des personnes se trouvant à l'intérieur de la pièce.



Dispositifs Sky Factory (gauche) et Rational Craft (droite).

Crédits : www.skyfactory.fr et www.rationalcraft.com

Dispositifs de suggestion intégrant une mise en scène lumineuse

Nous avons vu précédemment qu'il était très difficile de simuler une ouverture sur l'espace extérieur puisque les trois types de données que nous nous attendons à percevoir d'un tel dispositif (données informatives, distractives et sensation de profondeur) semblent encore impossibles à recréer simultanément. Cependant, il existe peut-être d'autres manières de simuler l'entrée de lumière, sans forcément en voir la source, par exemple en se basant simplement sur la sensation que nous évoque la lumière naturelle.

Fausses fenêtres

La création d'une fausse fenêtre éclairante peut suggérer un contact avec l'extérieur qui est en réalité inexistant. C'est le cas des dispositifs *Illuminated Virtual Window* créés par l'entreprise Linear Matrix. Ce dispositif s'appuie sur un cadre de fenêtre standard avec un vitrage translucide empêchant la vue sur l'extérieur. Placé en hauteur, ce dispositif crée un effet de leurre puisque, derrière des fenêtres, c'est une surface LED qui produit une lumière douce et naturelle qui peut, de plus, changer de tonalité.



Illuminated Virtual Window.

Crédits : www.linearmatrix.com.au

Devant la difficulté de recréer la sensation produite par une ouverture sur l'extérieur, certains artistes se sont penchés sur la sensation même de l'existence de la fenêtre qui laisserait deviner un extérieur. En 2007 par exemple, un store lumineux appelé *Bright Blind* est imaginé par Makoto Hirahara en collaboration avec Hisakazu Nabeshima.

Ce système consiste en un store d'apparence classique, mais qui en réalité présente des diodes électroluminescentes fixées sur ses lamelles. Ainsi, la lumière provient directement du store même si la sensation observée est d'avoir une source extérieure obstruée par le store.

Ce dispositif présente de plus l'avantage d'avoir des lamelles orientables afin de pouvoir faire varier l'intensité lumineuse produite. Cependant, face aux faibles dimensions que présente l'ensemble du dispositif lumineux (1 mètre de hauteur pour environ 60 centimètres de largeur), il est permis de douter du fait que ce dispositif puisse éclairer, à la manière d'une fenêtre, l'intérieur de la pièce dans laquelle il serait installé, et ce en l'absence d'autres dispositifs de lumière artificielle.



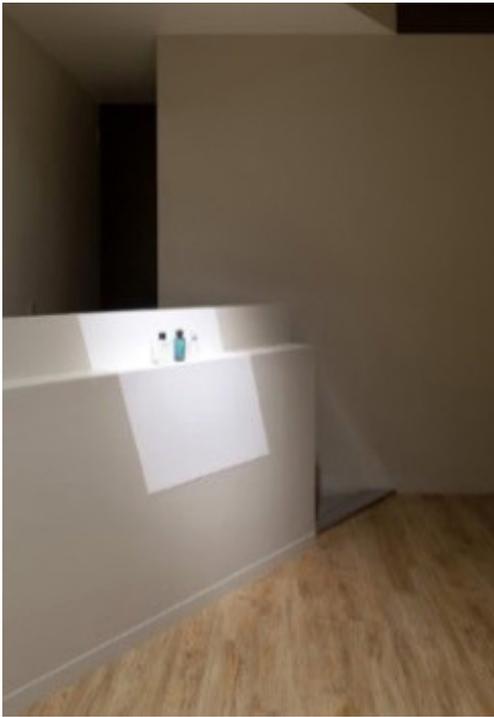
Bright Blind.

Crédits : Makoto Hirahara



En 2013, l'agence Takara Space Design intervient dans le salon de coiffure *GreeM*, situé à Tokyo. Pour pallier le manque de lumière naturelle dû à la petite taille des fenêtres existantes, les concepteurs ont peint de fausses taches lumineuses, d'une couleur plus claire que les murs, afin de donner une sensation de contraste à l'intérieur.

Ces taches lumineuses sont couplées à des spots lumineux, dirigés vers elles, afin de renforcer cette sensation.



Salon de coiffure *GreeM*.
Crédits : Takara Space Design

Surfaces éclairantes animées

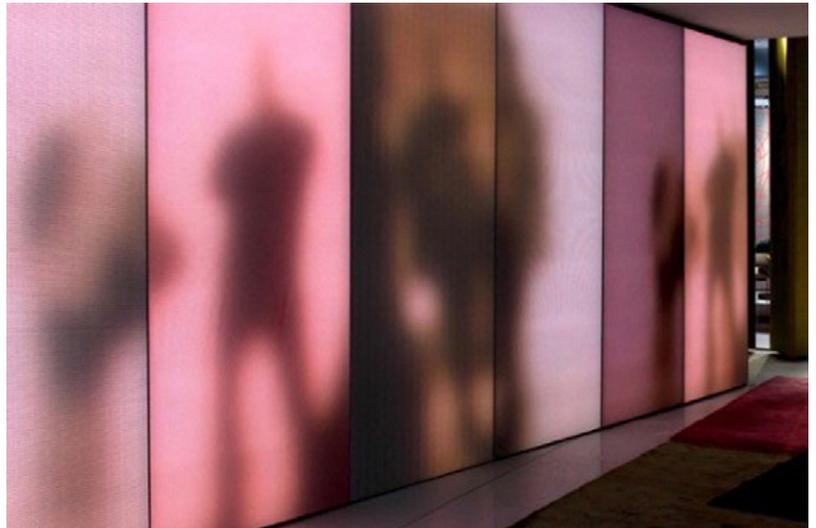
Les technologies LED actuelles produisent une lumière homogène, pouvant être très puissante si nécessaire, avec une température et des couleurs paramétrables. De plus, elles permettent la création de surfaces d'éclairage à grande échelle avec des critères de continuité et de faible consommation énergétique jusqu'alors impossibles. Ceci ouvre la porte pour les concepteurs lumière à des nouvelles manières de créer des situations lumineuses d'apparence naturelle.

C'est le cas des dispositifs *One Space* et *Luminous Textile Panels* imaginés par Philips. Pour le premier, il s'agit d'un plafond lumineux textile qui intègre la technologie LED dans la matière même. Cette surface, en plus d'améliorer l'acoustique de la salle grâce à l'utilisation de matériaux absorbants, produit un éclairage de type lumière de jour.

De plus, la continuité de la matière et son intégration au milieu du plafond produisent un fort contraste visuel qui nous laisse imaginer un lien à l'extérieur.

Le projet Luminous Textile Panel développe des panneaux textiles éclairés par des LED qui peuvent simuler des fenêtres sur un autre espace intérieur ou sur un espace extérieur. La mise en scène imaginée par les designers de Philips profite du réglage fin proposé par les surfaces LED pour passer des vidéos simulant des ombres ou des mouvements

extérieurs. Le dispositif propose également de nombreuses scènes mouvantes à placer sur les panneaux comme des nuages et un ciel bleu, des oiseaux, des ombres, de la végétation, etc.



▲ *One Space (à gauche) et Luminous Textile Panel (droite).* ▲

Crédits : www.philips.com

Mises en scène solaires

À mi-chemin entre la luminothérapie et la mise en scène lumineuse, l'entreprise suédoise Suntech a développé, selon les termes de son site web, un « simulateur du soleil pour environnements intérieurs ». D'après l'entreprise, leurs dispositifs d'éclairage reproduisent totalement le spectre lumineux et thermique du rayonnement solaire. Ils proposent deux systèmes selon la surface à éclairer et la hauteur sous plafond : le *Suntech Trippel* pour les pièces à plafond bas, et le *Suntech Hexagon*, pour les pièces à plafond haut. Commercialisés sous le nom de Sun Environments, ces espaces proposent une mise en scène thématique, parfois de manière caricaturale (voir illustrations ci-contre), qui complète l'exposition directe en groupe face à un dispositif de luminothérapie.



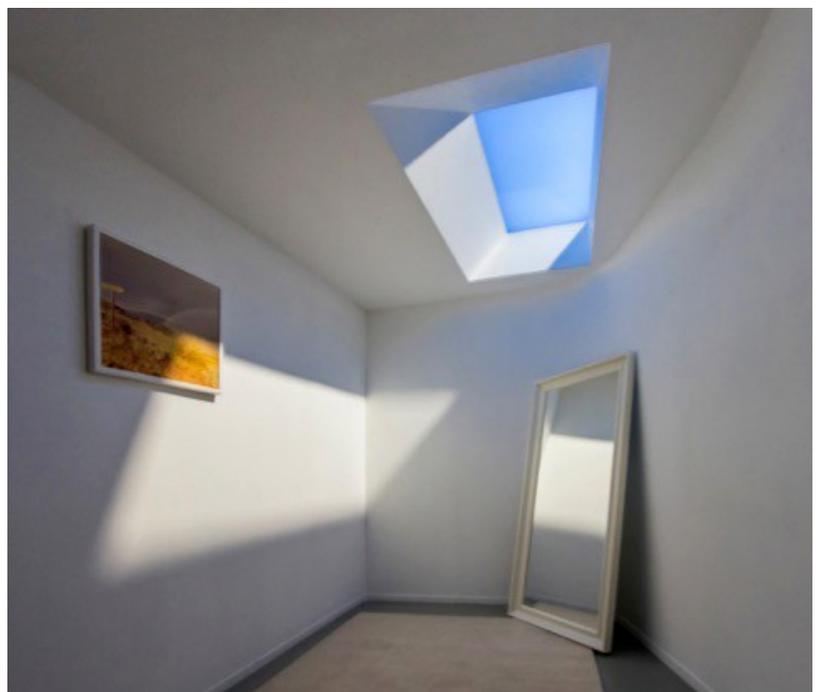
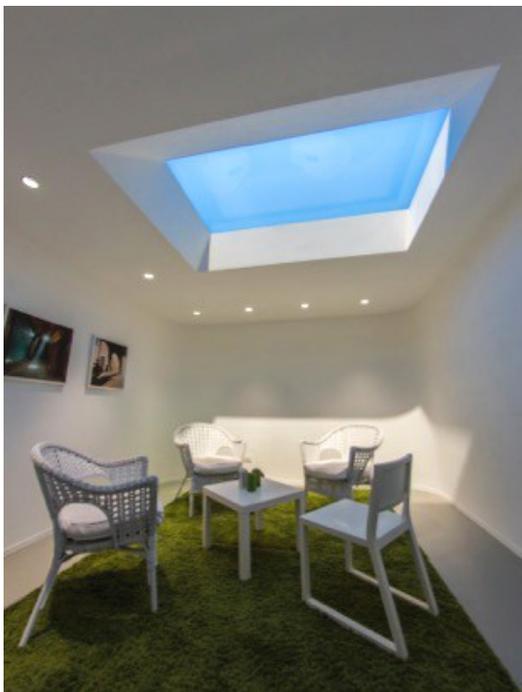
▲ Dispositifs d'éclairage et Sun Environments

Crédits : Suntech, <http://suntechgroup.se>

CoeLux® : vision du soleil et sensation de profondeur du ciel

Parmi l'ensemble des systèmes et stratégies d'éclairage repérés dans notre état des lieux, le dispositif CoeLux® mérite d'être mis en avant. CoeLux® est un dispositif imaginé par le professeur Paolo di Trapani appuyé sur des recherches financées par l'Union Européenne. Il a été sélectionné comme l'un des 12 projets les plus technologiquement novateurs en Europe. L'entreprise CoeLux Srl est une *spin-off* de l'université Insubria à Côme (Italie) dont nous avons pu visiter le siège installé dans le parc industriel ComoNext Technology Park, pendant la période du projet.

Ce dispositif consiste en « une fenêtre artificielle qui reproduit l'effet réel de la lumière et de l'espace extérieur » en imitant « la lumière naturelle du soleil, un ciel bleu dégagé et sa profondeur infinie ». Il s'agit d'un développement technologique axé uniquement sur la manipulation de phénomènes optiques liés à la lumière. Autrement dit, CoeLux® n'utilise ni les surfaces rétroéclairées ni les écrans numériques précédemment évoqués, mais des matériaux spécifiques qui permettent de simuler la sensation de ciel bleu infini, et un système de lampes qui permet d'y installer un soleil artificiel produisant lui-même une tache solaire factice.

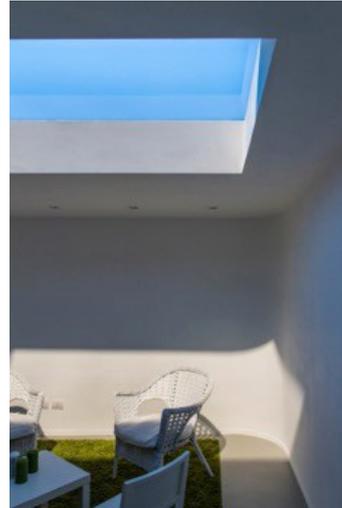


▲ Showrooms CoeLux® en 2016 avec les modèles 45HC et 45LC. ▲

Crédits : Ignacio Requena

Le premier élément fondamental de CoeLux® est bien le faux soleil. Par le biais d'une technologie LED, le système produit une lumière proche du spectre visible de la lumière naturelle. Le résultat est une source circulaire qui produit une lumière intense et uniforme, avec un rendu de couleur réaliste provenant d'un flux lumineux à rayons parallèles. Ceci permet de créer, d'une part, la vision directe du soleil dans le ciel au travers de la fenêtre, imitant l'effet d'une source qui semble infinie à celui qui la regarde.

D'autre part, le projecteur LED crée aussi l'effet indirect d'une tache solaire sur les parois de la salle éclairée. Selon Canazei *et al.* (2016), d'autres indices de réalité peuvent être perçus dans la lumière produite par CoeLux® : « *la couleur et la dimension de la zone en pénombre, le changement de couleur de l'ombre avec la distance de l'objet, le mouvement apparent du soleil à travers le ciel quand l'observateur se déplace autour de la fenêtre et le rapport de luminosité des zones ombragées et ensoleillées* ».



Vue directe de la source lumineuse et tache solaire.

Crédits : Daniel Siret et Ignacio Requena

Notre expérience personnelle de plusieurs showrooms CoeLux® à Milan et Londres nous montre que, de prime abord, le leurre est totalement réussi. Néanmoins, une observation plus prolongée permet de mieux comprendre que nous sommes face à un dispositif d'éclairage. En effet, des détails comme l'atténuation de l'éblouissement produit par la source lumineuse, la netteté des limites ombre-lumière de la tache solaire, ou encore la position statique du soleil, dévoilent naturellement le subterfuge.

La maîtrise des couleurs du ciel et des rayons du soleil permet d'interroger l'imaginaire porté par le soleil sous des climats particuliers. Cette relation a été explorée par les concepteurs de CoeLux® depuis son origine selon trois modèles. Le dispositif original CoeLux® 45 HC dispense des rayons à 45 degrés pour une lumière proche de celle des pays autour de la Méditerranée. Le CoeLux® 60 offre un angle de 60 degrés que l'on retrouve dans des endroits chauds, près de l'équateur ou des tropiques. Enfin, le CoeLux® 30 fournit une lumière chaude et douce avec des rayons bien plus horizontaux, comme en Scandinavie. Ce dernier n'est plus présent à l'heure actuelle sur le site web de CoeLux®.

La source lumineuse artificielle éclaire directement la surface d'un diffuseur, qui constitue le deuxième élément du dispositif. Il s'agit d'une surface de diffusion composée par un matériau nanostructuré qui recrée le processus naturel de diffusion de la lumière dans l'atmosphère. En d'autres termes, quand la lumière du projecteur traverse ce matériau, la lumière bleue est presque complètement diffusée, tandis que la composante rouge est transmise (Canazei et al., 2016). De cette manière, comme son créateur Paolo di Trappani l'explique, « CoeLux® simule les mêmes particules d'oxygène, de nitrogène et de CO2 que l'on peut trouver dans l'air et il comprime virtuellement l'atmosphère de 10 kilomètres d'épaisseur à quelques millimètres, créant ainsi un solide plutôt qu'un gaz ou un liquide ». Ce diffuseur est capable de reproduire, grâce à la lumière du projecteur, un ciel bleu en apparence totalement naturel et de créer la sensation d'un espace de profondeur infinie.



Ciel bleu produit par CoeLux 45 HC (à gauche) et apparence quand il est éteint (à droite).

Crédits : Daniel Siret et Ignacio Requena





Ainsi, la lumière produite par CoeLux® imite les conditions lumineuses extérieures d'un jour sans nuage. Un flux lumineux intense et légèrement jaune éclaire l'espace intérieur, créant des ombres aux objets tandis qu'une lumière bleue se diffuse dans l'ensemble de la pièce. L'expérience personnelle du dispositif nous confirme le réalisme d'un tel effet.

Ces deux éléments du dispositif se combinent avec un travail de mise en scène, cherchant à accentuer l'impression d'être face à une fenêtre réelle. En créant des ouvertures situées au plafond ou en hauteur de type imposte, CoeLux® s'affranchit en partie de la nécessité de données distractives, puisqu'il peut sembler naturel que l'activité dans le ciel soit moins riche que celle que pourrait proposer par exemple une baie vitrée sur la ville. De plus, l'intégration est renforcée par un travail sur la profondeur de l'encastrement visible de la fenêtre. Cet encastrement peut aussi produire des jeux de réflexion, comme c'est le cas pour le nouveau modèle CoeLux®45 SQUARE. Ce modèle installé en haut d'un mur comprend une surface en miroir collée au plafond qui augmente sa capacité d'éclairage et multiplie l'effet d'un dispositif plus petit que l'original. Il semble s'inspirer du travail d'Olaffur Eliasson pour *The Weather Project* évoqué précédemment.

L'un des points faibles du premier modèle de CoeLux® est lié à sa taille, son poids et, par conséquent, à l'espace requis pour son installation. Par exemple, d'après le distributeur energysquad.com, la fenêtre visible du CoeLux® 45 HC mesure 170 x 85 cm, tandis que le dispositif caché dans le faux plafond mesure 380 x 240 cm avec 100 cm de hauteur. De plus, son poids est de 350 kg. À tout cela, il faudrait ajouter l'espace supplémentaire pour son installation. Pour ces raisons, les ingénieurs de CoeLux® ont développé des solutions plus compactes, comme le modèle CoeLux® 45 LC qui a besoin d'environ 30 % d'espace en moins. De même, la stratégie de réduction de taille se concrétise dans les nouveaux modèles présentés pour le salon LuxLive 2016 à Londres : ST IBLA, ST TIVANO et ST NAOS. Il s'agit de solutions très compactes se concentrant sur l'effet du bleu du ciel avec seulement une petite tache solaire dans le cadre du dispositif. Un dernier point critique est lié à la consommation électrique moyenne de 350 W, très supérieure à celle d'un simple éclairage, même si ce n'est pas comparable au regard de l'intensité lumineuse trois fois supérieure produite par CoeLux® (Canazei *et al.*, 2016).

En résumé, grâce à leur technologie novatrice, les dispositifs CoeLux® permettent de reproduire le ciel bleu ainsi que le soleil et même la tache lumineuse créée par ce dernier. De plus, grâce à la puissance de sa source, le dispositif n'a pas besoin d'être couplé à un autre éclairage artificiel. CoeLux® permet donc de recréer l'impression de beau temps qu'on pourrait ressentir si la fenêtre était une réelle ouverture donnant sur un soleil éclatant lors d'une belle journée d'été. Malgré des désavantages qui le rendent encore peu accessible aux particuliers pour équiper leur logement (encombrement important, coûts élevés d'achat et d'utilisation), CoeLux® peut être considéré comme le dispositif créant au mieux l'illusion de beau temps à l'heure actuelle.

**CoeLux® peut être considéré comme le dispositif
créant au mieux l'illusion de beau temps à l'heure actuelle.**

4. Dispositifs médicaux de luminothérapie

Soigner avec la lumière

Le soin par la lumière a été développé au 19^e siècle, d'abord par les cures d'héliothérapie, puis par les dispositifs d'actinothérapie – c'est-à-dire l'utilisation thérapeutique des rayons du spectre solaire – popularisés en France par le docteur Saidman notamment. La découverte des rythmes biologiques circadiens par Elliot Weitzman en 1971, puis la mise en évidence de la suppression de la sécrétion de mélatonine lors de l'exposition à la lumière par le National Institut of Mental Health en 1980, vont donner de nouvelles perspectives à ces approches thérapeutiques. En 1984, le docteur Norman E. Rosenthal décrit les troubles affectifs saisonniers (TAS) dont la cause identifiée est le manque de lumière. Ainsi, pendant la période hivernale notamment, le manque de lumière déclenche une variation de la sécrétion de mélatonine, habituellement provoquée au moment du coucher du soleil, agissant sur notre rythme circadien.

À la fin des années 1980, des travaux de chercheurs font état du traitement des TAS par la lumière. Des dispositifs médicaux reproduisent donc la lumière, qui doit être captée par l'œil, pour mieux réguler la sécrétion de mélatonine. C'est la lumière artificielle, disponible à volonté, qui est utilisée à condition qu'elle reproduise le plus fidèlement possible la lumière blanche du jour. La luminothérapie est également recommandée pour agir contre les effets du stress, du décalage horaire, les sommeils dérèglés, les dysfonctionnements alimentaires, la fatigue chronique, etc. Les médias relaient les bienfaits de ce type de thérapie en proposant à travers des campagnes publicitaires des séances à l'hôpital. L'engouement se poursuit jusqu'à ce que des appareils de luminothérapie commencent à être commercialisés pour le grand public. Les séances ne sont donc plus médicales, elles peuvent être réalisées à la maison sans contrainte. Pour en optimiser les bienfaits, il est conseillé par les fabricants de s'exposer le matin devant la source lumineuse, pendant 20 à 30 minutes pour une intensité de 10 000 lux, et pendant 120 minutes pour une intensité de 2 000 lux, une relation ayant été observée entre durée et intensité. La lampe doit être placée en hauteur, au-dessus de la ligne d'horizon du regard, car il est ainsi plus facile aux rayons lumineux d'atteindre la rétine de l'œil sur sa zone la plus réceptive.



Situations d'exposition à la lampe de luminothérapie dans la sphère domestique.

Crédits : <http://luminothérapie.fr>





À l'arrivée des années 2000, des sites internet et des associations (*Agir pour sa santé* par exemple) proposent différents appareils pour un « bonheur total » (Phelouzat-Perriquet et de La Soudière, 2007). Des établissements accueillant du public, à l'instar des aéroports de Paris, proposent des séances de luminothérapie pour les voyageurs en décalage horaire (Freyheit, 2009). Les dispositifs de luminothérapie s'invitent également dans les lieux de travail proposant à chacun de bénéficier des bienfaits de la lumière, supposée augmenter la capacité de concentration et donc la productivité. En dehors des logements et des espaces de travail, certains lieux sociaux comme les cafés proposent des « Light Rooms » : salles immaculées accompagnées d'un équipement lumineux adapté. Ce type d'installation semble être répandu notamment dans les universités des pays nordiques sous le nom de *Ljusrum*.

Ljusrum des universités d'Uppsala
et de Jönköping en Suède.

Crédits : <https://www.uu.se/student/stod-och-service/studenthalsan/ljusrum/>
et <http://ju.se/student/service/studenthalsan/ljusrum.html>

Passagers s'exposant à des dispositifs
de luminothérapie dans un aéroport parisien.

Crédits : <http://didier-versavel.com/portfolio/aeroport-de-paris>



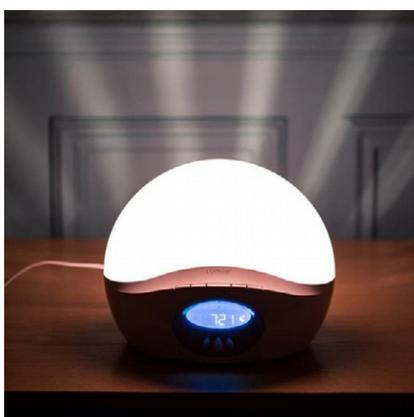
On voit parallèlement apparaître des simulateurs d'aube qui, même s'ils ne peuvent être utilisés dans le cadre de la luminothérapie puisque la lumière qu'ils émettent est trop faible, permettent malgré tout de lutter contre la dépression saisonnière. Ces dispositifs se présentent sous la forme de réveil qui simule un lever de soleil.

Parallèlement au développement des dispositifs de luminothérapie et des simulateurs d'aube, la commercialisation des ampoules dites à lumière du jour se développe. Ce sont des lampes dont la puissance reste classique (de 9 à 25 W en moyenne) mais dont la qualité de la lumière se veut proche d'une belle journée de printemps. Ces lampes reproduisent la quasi-totalité du spectre lumineux de soleil (température de couleur entre 5 000 K et 6 500 K) pour jouer sur notre cerveau et notre corps afin d'en augmenter la vitalité, améliorer l'humeur. Contrairement aux dispositifs de luminothérapie, les ampoules à lumière du jour ne nécessitent pas le changement des luminaires.



Ampoule lumière du jour et spectre complet 15W E27 Narva.

Crédits : <http://www.biolumineco.fr/ampoule-lumiere-du-jour-et-spectre-complet-15w-e27-narva.htm>



Simulateur d'aube LUMIE 250.

Crédits : <https://www.natureetdecouvertes.com/bien-etre/luminothérapie-reveils/simulateurs-aube/simulateur-d-aube-lumie-250-40124270>

La luminothérapie chez soi

Sortie du contexte médical, la luminothérapie répond aujourd'hui plus largement à une recherche de bien-être, c'est pourquoi des dispositifs adaptés à l'habitat sont en vente pour une pratique à domicile. Afin de mieux connaître l'usage que font les habitants de ce type de dispositifs et l'impact de leur utilisation dans l'aménagement de l'habitat, nous avons conduit une analyse basée sur les commentaires laissés spontanément par des acheteurs de ces dispositifs sur le site internet d'Amazon France qui vend ces produits. Ces commentaires représentent un discours direct des acheteurs, ils donnent ainsi accès à leurs témoignages. Quatre dispositifs de luminothérapie parmi les plus commentés au moment de notre étude ont été sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques, le but étant de couvrir ainsi l'offre existante par des produits aux particularités variées : surface d'éclairage, prix, température de couleur, technologie, marque, etc.



Les 4 lampes de luminothérapie personnelle utilisées dans l'étude (source Internet).

La méthode d'analyse a consisté tout d'abord à relever tous les commentaires laissés sur le site au moment de notre enquête pour les rassembler dans un même document. Ce recueil recense plus de 300 commentaires, chacun d'entre eux étant analysé selon différentes catégories apportant des éléments de réponse quant à l'usage du dispositif dans l'habitat : qualité de la lumière, temps d'utilisation, lieu d'utilisation, bienfaits observés, caractéristiques de l'objet. Ce traitement systématique permet une analyse plus efficace et met au jour notamment les redondances ou commentaires isolés.

La lumière produite par ces dispositifs est très souvent comparée par les acheteurs à la lumière naturelle, ce qui va dans le sens du discours des fabricants dont l'objectif est de créer un spectre lumineux se rapprochant de celui du soleil. Un des dispositifs étudiés permet de faire varier l'intensité pour rappeler le cycle journalier, ce qui semble apprécié.



Concernant sa température de couleur, la lumière est décrite comme étant blanche avec des variantes du blanc chaud au blanc froid.

Il semble que la saison adéquate pour profiter des bienfaits de cette lampe soit à partir de septembre jusqu'à la fin de la période hivernale. Les dispositifs sont souvent utilisés pendant les journées de mauvais temps. L'automne et l'hiver sont donc associés à l'image du mauvais temps. Le matin est la période de la journée où la lampe est la plus sollicitée, ce qui va dans le sens des recommandations des fabricants.

Si les bienfaits promis par les fabricants sont nombreux, il est difficile d'en évaluer le réel impact auprès des utilisateurs à travers leurs commentaires. En revanche, il a été remarqué que les utilisateurs disent ressentir une sensation de bien-être, de relaxation et de bonne humeur. La lumière produite semble réconfortante et donne de l'énergie et de la motivation, selon certains utilisateurs, comme ce qu'il est commun de ressentir au printemps, lors des premiers rayons du soleil après l'hiver.

Dans les commentaires en ligne, le lieu géographique de l'habitat n'est pas souvent précisé, mais beaucoup d'internautes expliquent qu'ils ont déménagé ou voyagé. L'utilisation du dispositif répond à l'objectif de se réadapter à son nouvel environnement après un changement de climat.

Dans l'habitat plus particulièrement, les commentaires des acheteurs laissent penser que les lampes sont présentes dans la plupart des pièces qui composent le logement. La lampe peut être transportée de pièce en pièce pour accompagner l'habitant dans ces différentes activités : manger, se laver, lire, effectuer des tâches ménagères, etc. La durée d'exposition varie d'une personne à une autre, oscillant entre 20 minutes et 2 heures comme le préconise le fabricant. Certaines personnes laissent la lampe allumée toute la matinée, bénéficiant de sa lumière pendant leurs activités quotidiennes, ce qui nous interroge sur la perception de la différence entre le dispositif de luminothérapie et un autre dispositif d'éclairage artificiel.

L'utilisation de la lampe semble relativement fréquente, entre une et deux fois par jour. La manipulation devient une habitude. Le geste est entré dans le quotidien et la mise sous tension de la lampe est parfois la première action de la journée. Mais on note que ces dispositifs sont également utilisés dans les lieux de travail lorsque la tâche s'effectue sur un poste fixe comme par exemple sur un bureau près d'un ordinateur. De ce fait, des caractéristiques particulières des lampes de luminothérapie semblent être appréciées par les acheteurs : la mobilité aisée, les différents systèmes de fixation (sur pied ou mural), le faible encombrement, l'alimentation sans câble.

Concernant l'objet en lui-même, on a relevé de nombreuses divergences de points de vue. Par exemple, pour la taille de l'écran diffuseur de la lampe, certains le trouvent trop grand, d'autres trop petit ou encore à la bonne taille. Comme nous savons que les dispositifs peuvent prendre place dans toutes les pièces de l'habitat, nous pouvons supposer que ces jugements dépendent de l'aménagement du logement en lui-même. Malheureusement, nous n'avons pas assez d'informations pour confirmer cette hypothèse, ce qui rend difficile la réalisation d'une synthèse des commentaires à ce sujet.



Le tableau page 55 reprend quelques commentaires illustratifs des acheteurs.



À travers le recueil et l'analyse des commentaires, nous avons un accès direct au vécu des acquéreurs, ce qui a permis de mieux connaître ce que cherchent les habitants en achetant ce type de produit. Nous avons ainsi pu mettre en évidence que la lumière produite est perçue comme blanche et intense, ce qui était prévisible car cela fait partie des qualités annoncées par le fabricant. Concernant l'usage, il s'agit souvent d'une automédication, banalisant la lampe. En effet, celle-ci est perçue plus comme un objet du quotidien, tel un baladeur musical, que l'on peut utiliser selon ses envies. L'appareil utilisé dans un contexte domestique devient un véritable objet de compagnie, ayant pour but le réconfort par la lumière solaire. Nous pouvons ici proposer l'expression de « soleil de compagnie ».

En revanche, la référence à « une belle journée de printemps » ou à une image similaire n'apparaît pas clairement dans le discours des habitants. On peut émettre l'hypothèse que la production ponctuelle de lumière ne suffit pas à faire émerger un sentiment d'ambiance lumineuse précédemment vécue sous une saison différente, même si un utilisateur indique que la lumière de la lampe « *transforme les petits matins d'hiver en fin de matinée d'été* ». Des facteurs comme la vue du ciel, de l'extérieur, la sensation de profondeur, la perception d'un mouvement ou du passage du temps sont des éléments nécessaires pour établir la connexion entre lumière artificielle et lumière naturelle. De plus, les dispositifs de luminothérapie ressemblent à des dispositifs d'éclairage artificiel traditionnels. S'ils peuvent tromper notre corps en favorisant la sécrétion de certaines hormones, ils ne modifient pas notre appréciation de l'espace et du temps : même si la lampe de luminothérapie est allumée, l'habitant perçoit toujours que la nuit est tombée et qu'il est à l'intérieur de son logement, contrairement au dispositif CoeLux® présenté précédemment.

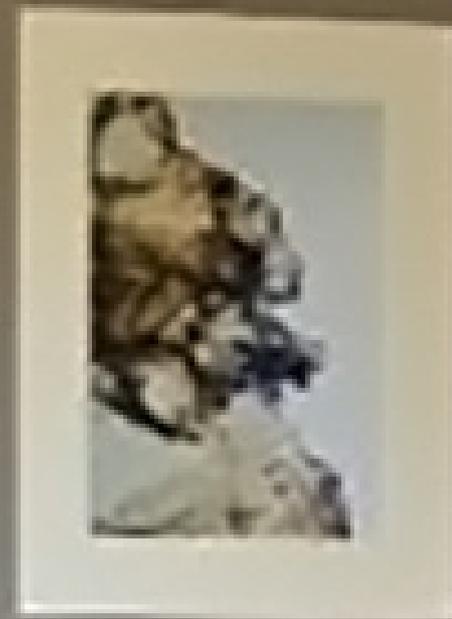
Notre objectif était également d'étudier les effets de l'utilisation de ce type de dispositif sur l'aménagement de l'habitat. Nous n'avons malheureusement pas eu accès à des informations très précises pour apporter des éléments de réponse à cette question. Toutefois, les commentaires succincts laissés sur le site d'achat traduisent l'utilisation nomade du dispositif d'une pièce à l'autre. Nous pouvons supposer que les lampes ne donnent pas lieu à une mise en scène particulière dans le logement. Il serait nécessaire de confirmer cette hypothèse par une enquête approfondie chez les habitants.

Chacun peut profiter d'une lumière réconfortante, qui transforme les petits matins d'hiver en fin de matinée d'été.

Extraits de commentaires relevés en ligne.

| | |
|--|---|
| <p>« C'est la deuxième que je commande. Pour des séances de luminothérapie d'une efficacité redoutable quand la luminosité commence à baisser en automne. Pour combattre la dépression saisonnière très efficacement. »</p> | <p>« En ces temps de journées courtes, cet appareil permet d'avoir la sensation d'un peu plus de soleil. »</p> |
| <p>« J'habite un endroit nuageux et depuis que je l'ai le soleil est revenu ! »</p> | <p>« La lumière émise est puissante et donne vraiment l'impression de prendre un bain de soleil. La seule différence, c'est l'absence de chaleur (tant mieux pour la consommation, moins pour les sensations !). »</p> |
| <p>« Je l'utilise une bonne heure le matin, pour ranger et nettoyer la cuisine, préparer le dîner puis me récompenser par une bonne pause lecture au salon et j'aime ce moment de la journée (mon chien aussi, mais lui est toujours de bon poil...) »</p> <p>« Elle se change facilement de place, grâce à sa poignée, s'installe facilement grâce à son pied escamotable et peut même s'accrocher. La lumière émise est blanche mais pas blafarde ni aveuglante. »</p> | <p>« Lorsque je m'expose le matin à ma lampe de luminothérapie, je sens une énergie agréable montée en moi. Depuis, cela est devenu un réflexe incontournable du matin que d'allumer ma lampe de luminothérapie. »</p> |
| <p>« Facilement transportable et relativement maniable, cette lampe peut se poser sur toutes les tables, bureaux. Par ailleurs, une barre lumineuse indique le temps de marche de l'appareil. Pour ma part, cette indication est un plus mais pas réellement nécessaire. »</p> | <p>« J'ai commencé par le réveil - qui a changé mes débuts de journée - j'ai enchaîné sur l'appareil format (presque poche) que je laisse dans ma salle de bains et que je réserve à mon usage personnel, et j'ai désormais converti l'ensemble de la famille grâce à ce modèle quasi familial justement. »</p> |
| <p>« Je le branche en même temps que j'installe le petit-déjeuner et ainsi chacun peut profiter d'une lumière réconfortante, qui transforme les petits matins d'hiver en fin de matinée d'été. »</p> | <p>« Je la mets en coin dans la pièce les jours où il ne fait pas beau et qu'il fait un peu sombre, ça éclaire la pièce avec une jolie lumière blanche. »</p> |

La présence du soleil
est sans aucun doute
le premier ingrédient
du beau temps.



Voir le soleil chez soi : une étude empirique

1. La tache solaire et la suggestion du beau temps chez soi

Le beau temps

La notion de beau temps est fortement liée au contexte climatique et culturel dans lequel nous évoluons. Si pour certaines personnes un temps pluvieux pourrait être qualifié de beau, la définition la plus générale du beau temps implique un moment de la journée où le soleil brille. Comme Nicole Phelouzat le suggère dans ses travaux sur le beau temps et la bonne humeur, la présence du soleil est « sans aucun doute le premier ingrédient du beau temps » (Phelouzat, 2010).

Actuellement, l'imaginaire du beau temps fait référence au soleil de n'importe quelle saison. Selon Alain Corbin, « *l'exaltation des douceurs du printemps et des ombres de l'automne* » jusqu'au début du 20^e siècle a été remplacée par « *les lumières intenses de l'été* » (Corbin, 1991). Les rayons du soleil estival ont une inclinaison et une coloration particulières liées à la latitude, qui interrogent notre expérience sensible ; de l'orange chaleureux du lever du soleil au rouge orangé du soleil couchant en passant par le blanc froid du soleil au zénith, nos souvenirs sont remobilisés à partir de la simple vision du soleil.



D'après Phelouzat, le deuxième ingrédient de « *la belle humeur météo, synonyme du soleil vainqueur des nuages* » est le ciel bleu. L'imaginaire des vacances et de la bonne humeur est très souvent lié à un ciel bleu, comme le montrent de nombreuses affiches publicitaires. Une recherche préalablement menée au Crenau montre que dans 64 % des images d'affiches de promotion de projets immobiliers, le ciel est clair avec quelques nuages, dans 30 % d'entre elles le ciel est totalement bleu et seulement dans 6 % des cas, le ciel est couvert (Moreno, 2011). Selon Éric Dardel « *le bleu du ciel agit d'ordinaire sur nous comme le fond qui donne forme aux collines et aux montagnes, et, en même temps, comme victoire sur la pesanteur [...] qui invite au rêve et à la spéculation* » (Dardel, 1990).

Cependant, le beau temps, même s'il semble être synonyme de bien-être, peut également être ressenti de manière désagréable. Les symptômes de gêne les plus courants sont la chaleur et les brûlures que le soleil peut infliger, puisqu'ils sont ceux que nous percevons le plus rapidement. Ces coups de chaleur ou de soleil ne sont pas les seuls dangers d'une longue exposition aux rayons du soleil. En effet, selon le site de l'Organisation mondiale de la santé, le soleil peut être soit partiellement responsable, soit accélérateur de cancers de la peau et de cataractes. Le rayonnement UV semble également avoir des effets négatifs sur le système immunitaire de l'être humain, et pourrait donc ainsi augmenter le risque de maladies infectieuses.

Déjà en 1967, l'architecte Twarowski expliquait, dans son ouvrage *Soleil et architecture*, que sans la présence d'ombre en complément du rayonnement, il est difficile de supporter le soleil trop longtemps : « *le sur-enseulement de l'appartement tout entier peut en effet s'avérer plus nuisible qu'un sous-enseulement* » (Twarowski, 1967).

Tache lumineuse du soleil

Dans l'espace architectural, le jeu entre l'ombre et le soleil, qui participe à l'expérience du beau temps, est manifesté par la présence des taches solaires. Au cœur de nos travaux depuis quelques années (Drozd et Siret, 2013), ces taches solaires peuvent être définies comme les marques lumineuses dues à la projection du soleil sur le sol et sur les parois intérieures d'un espace à travers ses différentes ouvertures, en supposant un ciel parfaitement dégagé. Les taches solaires sont dynamiques et doivent être définies pour un instant précis de l'année (heure, date).

Nos travaux précédents montrent comment les taches solaires sont liées au ressenti des habitants dans l'espace et, par conséquent, à la manière dont ils s'approprient et construisent leur chez-soi (Drozd *et al.*, 2016). Cette influence sur le confort des habitants a été approchée dans les travaux de Laurent Serres sur la perturbation thermique locale produite par une tache solaire. Il propose des solutions pour modéliser numériquement la tache solaire et pour étudier le lien entre les apports solaires liés aux taches et le confort thermique intérieur d'un local depuis une approche physiologique (Serres, 1997).

Le pouvoir évocateur de la tache solaire est exploré par les installations artistiques de Daniel Rybakken, comme nous l'avons expliqué dans la partie 2 de ce rapport. Ses travaux montrent que la tache solaire reflète aussi un lien indirect au monde extérieur. Il est intéressant de noter que l'ombre est différente selon la météo extérieure. S'il fait beau, il y aura présence d'une tache lumineuse dont les contours nets trancheront nettement avec le côté plus sombre de l'ombre. Au contraire, si le temps est couvert, les rayons directs ne seront pas présents et la lumière diffuse créera des ombres plus floues, sans zone lumineuse intense pour les délimiter. Finalement, si le temps est couvert, la tache lumineuse peut être fortement nuancée, voire totalement effacée.

Ces variations soulignent deux caractéristiques importantes de la tache solaire. En premier lieu, celle du contraste lumineux. En effet, il y a une différence entre l'intensité des rayons directs du soleil créant la tache et celle des réflexions et réfractions des rayons solaires produisant un éclaircissement de l'intérieur de la pièce en général. En second lieu, la forme de la tache lumineuse, qui nous indique celle de l'ouverture par laquelle elle est générée ainsi que l'environnement extérieur proche du bâtiment, par exemple la présence des arbres.

2. Une méthode de recherche pour évaluer le ressenti lié à la tache solaire

Afin d'avoir accès au ressenti lié à la présence de la tache solaire chez soi, nous avons mis en place une méthodologie de recherche nous permettant, dans un premier temps, d'évaluer l'existence ou non d'une corrélation entre la présence d'une tache solaire et le ressenti du beau temps et du soleil dans l'espace vécu. Dans un deuxième temps, nous avons cherché à qualifier le ressenti induit par la tache solaire. Notre objectif étant de comprendre l'impact de la tache sur l'apparence globale d'un environnement domestique, nous nous sommes appuyés sur une méthode de comparaison déjà validée par la littérature, à partir d'images bidimensionnelles (Fernandez, 2012 ; Dumortier *et al.* 2014 ; Vigier, 2015).

Évaluation globale de l'impact de la tache solaire sur des espaces domestiques

La première étape consiste à déterminer l'influence de la présence ou de l'absence d'une tache solaire sur le chez-soi. Pour ce faire, nous avons mené une enquête sur un ensemble d'images d'espaces intérieurs domestiques dont la seule différence est la présence ou l'absence de la tache solaire. Les personnes enquêtées évaluent leur perception globale d'un environnement, sans avoir connaissance que l'objet d'étude est la tache solaire.

Cette évaluation est réalisée avec la méthode des différentiels sémantiques. Chacune des images est caractérisée selon un questionnaire composé de huit paramètres différents représentés par un binôme d'adjectifs opposés (figure ci-après). Une échelle de sept cases entre les deux adjectifs permet aux personnes interrogées de choisir quel degré correspond le mieux à ce qu'elles ressentent par rapport à l'image. Voici les huit binômes d'adjectifs retenus après plusieurs tests de la méthode : désagréable/ agréable, sombre/ lumineux, froid/ chaud, stressant/ apaisant, mauvais temps/ beau temps, discordant/ harmonieux, triste/ gai, repoussant/ accueillant. À ces binômes d'adjectifs, nous ajoutons également deux questions permettant aux personnes de qualifier la saison et le moment de la journée à laquelle elles estiment que la photo a été prise. La figure ci-dessous montre le questionnaire de l'étude.

Questionnaire à remplir pour chaque image.

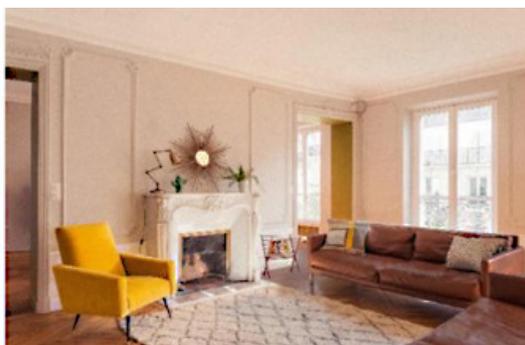
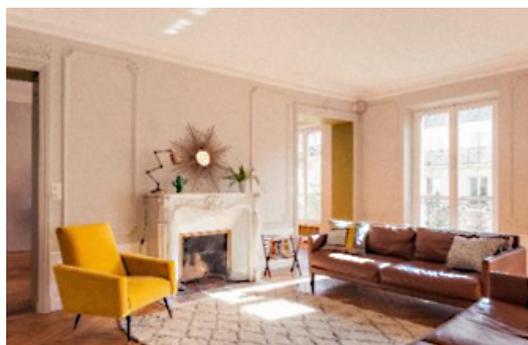
| | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|-------------|-----------|--------------------|------|--------------|------------|---|--------------------|--|
| Sexe : <input type="checkbox"/> H <input type="checkbox"/> F | | Âge : | | Profession : | | Date : | | | | |
| IMAGE N° | Désagréable | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | Agréable | |
| | Sombre | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | Lumineux | |
| | Froid | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | Chaud | |
| | Stressant | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | Apaisant | |
| | Mauvais temps | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | Beau temps | |
| | Discordant | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | Harmonieux | |
| | Triste | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | Gai | |
| | Repoussant | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | Accueillant | |
| | Saison | | Printemps | | Été | | Automne | | Hiver | |
| | Moment de la journée | | Matin | | Midi | | Après-midi | | Soir | |

Les images à évaluer ont été sélectionnées parmi des photographies d'espaces intérieurs meublés, publiées sur internet par des revues de décoration grand public. Ainsi, ces images correspondent dans une certaine mesure aux codes culturels du confort dans l'habitat. Le choix des images évaluées a été fait selon des critères de forme (cadrage horizontal, images en couleurs, photos réelles) et de contenu (présence de taches solaires naturelles, pas d'indices extérieurs sur la météo, pas de vue claire sur l'extérieur, pas de personnes sur les photos).

Par la suite, nous avons gommé les taches solaires des photos afin de créer dix images supplémentaires. Ainsi, nous avons obtenu au final dix paires de photos avec et sans taches solaires. Les images ont été numérotées aléatoirement et nous avons constitué deux carnets de photos, comprenant chacun cinq images avec taches et cinq sans taches, que nous avons fait évaluer aux personnes interviewées. Afin d'éviter des comparaisons révélant l'objet de l'enquête, aucun carnet ne comprenait une image avec tache et sa correspondante retouchée. La figure ci-après montre les dix couples d'images.

Nous avons imprimé les livrets de dix photos en format A5 sur un papier de 250 g. Nous avons mené deux campagnes d'enquête en juillet 2016 et en mai 2017, interrogeant au total deux cents personnes à Nantes. Ce travail a été réalisé avec des conditions climatiques et des conditions de ciel différentes, auprès d'un échantillon de population diversifié en termes de genre, d'âge et de catégorie socio-professionnelle. Chaque personne interrogée devait évaluer dix photos selon le questionnaire décrit préalablement. Les enquêtés étaient invités à évaluer les images une par une, répondant au questionnaire le plus naturellement possible et évitant tout recours à la réflexion. Les photos de chaque livret étaient régulièrement mélangées pour éviter une influence de l'ordre d'évaluation.

Binômes d'images à évaluer avec taches solaires (gauche) et sans taches solaires (droite).



Binômes d'images à évaluer avec taches solaires (gauche) et sans taches solaires (droite).





Binômes d'images à évaluer avec taches solaires (gauche) et sans taches solaires (droite).



Qualification des ambiances lumineuses produites par une tache solaire

Suite aux résultats de l'enquête précédente, nous avons voulu approfondir la qualification des effets de la tache solaire dans la perception des images. Pour ce faire, nous avons mené des entretiens semi-directifs selon une méthode de photo-entretien (Bigando, 2013). Cette méthode nous semble pertinente pour faire émerger une parole habitante sensible autour de la lumière naturelle chez soi, des qualités de la tache solaire, de l'expérience de la lumière directe dans l'habitat ou encore du vécu autour de la tache lumineuse. Nous voulions également tester si, en présentant exactement les mêmes images, la tache solaire est perçue directement ou si c'est le changement d'ambiance qui est constaté en premier lieu.

Le couple d'images avec et sans taches retenu pour la méthode (figure ci-dessous) a pour base une photo présentant de nombreux objets permettant de lancer la discussion, et où la source de la lumière n'est pas visible.

Les entretiens se sont déroulés en quatre temps. En premier lieu, suite à une présentation générale de l'objet de la discussion, nous présentons à l'enquêté l'image sans tache solaire qui déclenche une description et une évaluation personnelle de l'espace. En deuxième lieu, nous retirons la première image et nous présentons la même image avec une tache solaire. Nous demandons de décrire la nouvelle image. Ensuite, en présentant les deux images côte à côte, nous orientons le discours sur les différences, ce qui dirige naturellement la parole vers les qualités lumineuses de l'espace. Enfin, si l'expérience lumineuse chez soi n'a pas été évoquée, nous posons la question en laissant l'enquêté répondre librement.

Nous avons interrogé dix-neuf personnes pendant le mois de juillet 2016 à Nantes. Tous les entretiens se sont déroulés dans un espace intérieur. Les entretiens ont été retranscrits et analysés. Les résultats et conclusions sont présentés par la suite.



Couple d'images retenu comme support des entretiens.

3. Analyse de l'effet d'une tache solaire chez soi

Effet positif sur la perception des images

L'analyse globale des réponses aux questionnaires montre que la présence de la tache solaire fait varier positivement les jugements des enquêtés. Les images avec tache solaire sont toujours davantage appréciées en comparaison avec celles sans tache solaire. Encore une fois, cet effet a été remarqué quels que soient l'âge et le sexe des interviewés, ainsi que les conditions météo de l'enquête. Les mêmes résultats d'ensemble ont été obtenus lors des deux campagnes d'enquête, menées par deux personnes différentes.

Comme le montre la figure ci-dessous, cette appréciation positive de l'image avec tache est confirmée pour chacun des dix couples d'images. Nous pouvons également constater que la quasi-totalité des résultats pour les images avec tache solaire penchent du côté positif de la grille d'évaluation. Ce n'est pas le cas pour les images sans tache.

Moyennes des résultats des deux campagnes d'enquête par couples d'images.

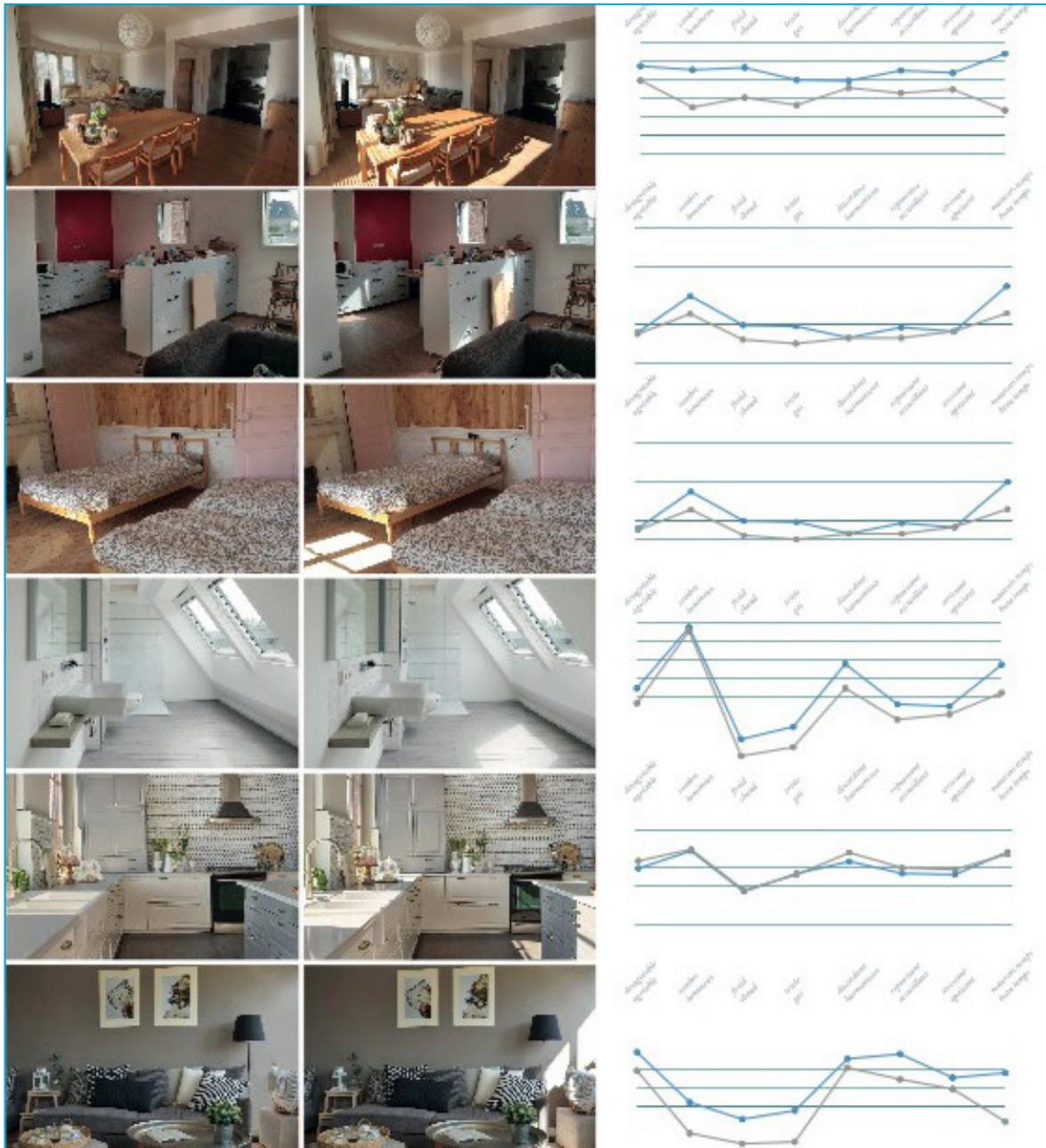
Les courbes bleues représentent les moyennes pour les images avec taches.
Les courbes grises représentent les moyennes pour les images sans taches.



Moyennes des résultats des deux campagnes d'enquête par couples d'images. (suite)

Les courbes bleues représentent les moyennes pour les images avec taches.

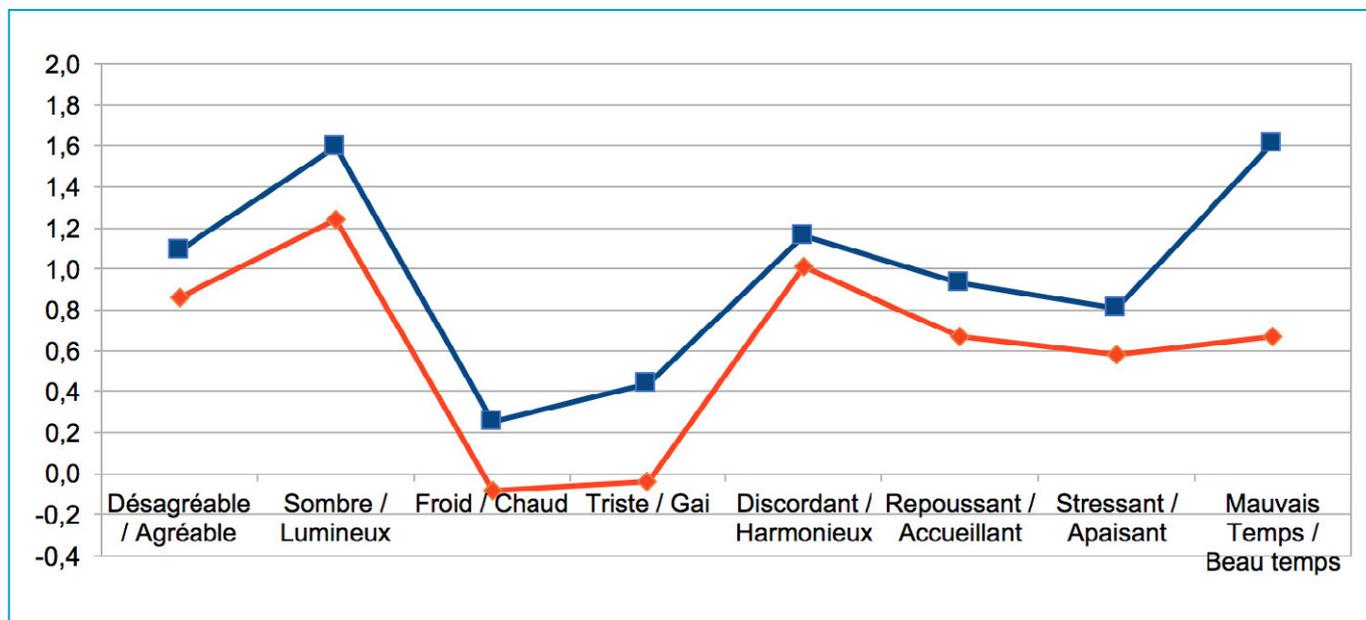
Les courbes grises représentent les moyennes pour les images sans taches.



Une observation plus précise montre que les écarts entre les moyennes des photos avec taches et celles sans taches varient selon l'aspect évalué. D'une part, la divergence de l'appréciation est plus importante pour les binômes sombre/lumineux, froid/chaud, triste/gai, repoussant/accueillant et mauvais temps/beau temps, avec des écarts entre 0,3 et 0,5. D'autre part, cette différence est plus nuancée pour les binômes désagréable/agréable, discordant/harmonieux

et stressant/apaisant. La présence visuelle du soleil modifie donc de manière inconsciente l'appréciation que nous avons des espaces habités. Cette présence, même sans en faire l'expérience, rend l'appréciation de l'espace plus agréable, plus lumineux, plus chaud et plus gai. Comme nous avons pu le voir précédemment, tous ces adjectifs peuvent être reliés au beau temps.

Notes moyennes obtenues par les photos avec et sans taches.
La courbe bleue représente les moyennes pour les images avec taches.
La courbe rouge représente les moyennes pour les images sans taches.



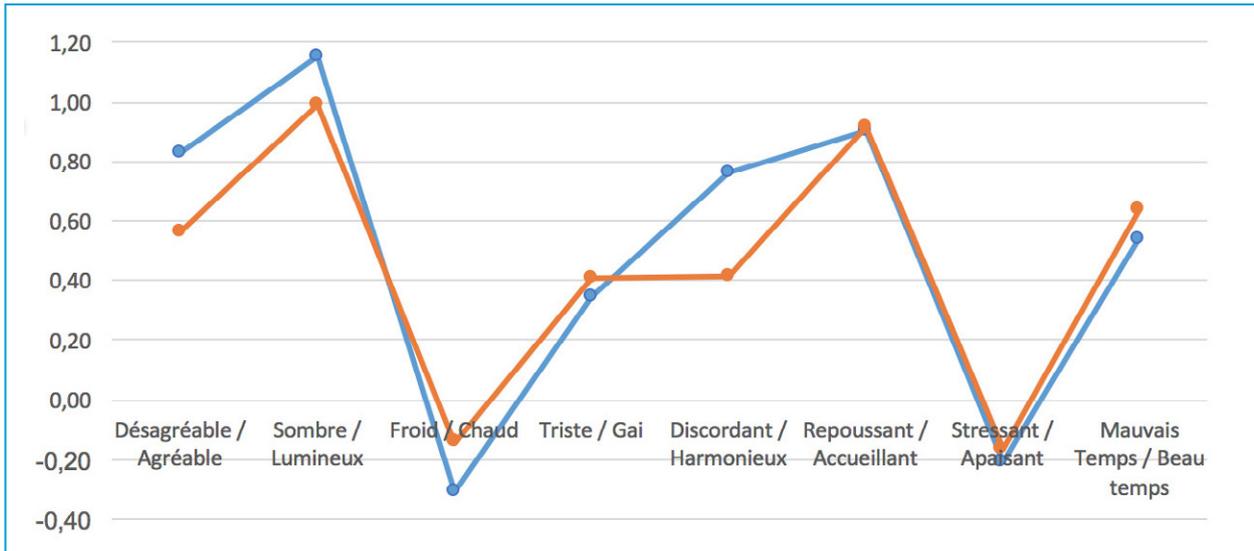
L'effet positif dans la perception globale des images est également confirmé lors des entretiens semi-directifs. L'analyse lexicale du discours des interviewés, avec une écoute attentive des adjectifs utilisés, révèle que l'image avec taches solaires n'a pas suscité de commentaires négatifs. Des adjectifs comme agréable, calme, chaleureux, confortable ou lumineux ont été utilisés pour décrire les deux images, en plus grande mesure pour l'image avec taches. *A contrario*, l'image sans tache a été jugée avec moins d'adjectifs positifs, voire avec des appréciations négatives comme artificiel, froid, triste, neutre ou sombre. Par exemple, 11 personnes sur 19 ont qualifié l'image sans taches d'image de magazine, artificielle, avec une mise en scène importante. Ces mêmes personnes ont souligné que l'image avec taches leur semblait plus habitée, plus naturelle, comme une photo qu'ils auraient pu prendre eux-mêmes chez eux.

Les entretiens nous montrent que pour la majorité des personnes, les effets créés par les taches solaires sont associés à des souvenirs agréables. Elles ont associé souvent la tache solaire à la lumière d'une certaine pièce pendant un moment particulier de la journée, ce qui est souvent lié à l'orientation de la maison ou de l'appartement : « *aller dans la chambre en fin de journée, plus facilement, pour se reposer [...] à partir du moment où on arrive vers mars, et que le soleil, vers 18 heures, arrive sur le bout du lit là* ».

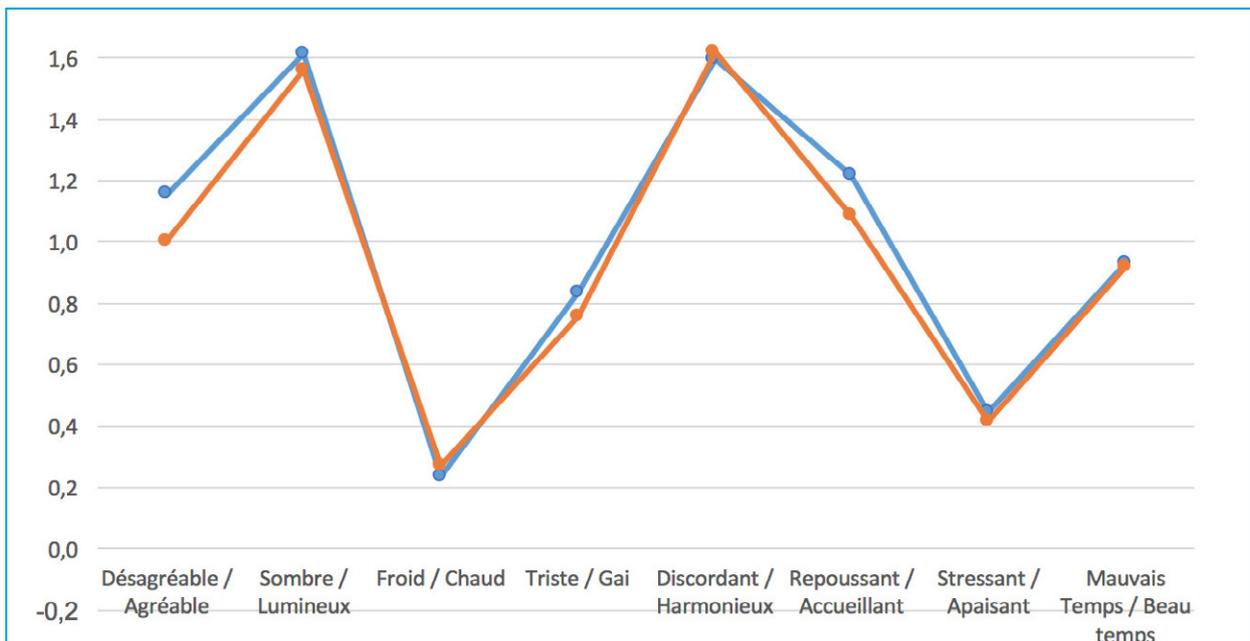
Effet consensuel de la présence de la tache solaire dans les images

L'analyse statistique des questionnaires a permis de constater que les avis des enquêtés se ressemblaient davantage quand il s'agissait d'évaluer les images avec taches solaires. Pour les deux campagnes d'enquête, nous avons pu constater la convergence des avis autour des images avec taches solaires indépendamment de l'âge et du genre des interviewés, ainsi que des conditions météorologiques lors du déroulement de l'enquête. Au contraire, les résultats pour les images sans taches sont plus divergents, ne révélant pas un avis consensuel pour l'échantillon de population étudié. Étant donné que la seule différence est la présence de la tache solaire, nous pouvons faire l'hypothèse que celle-ci produit un effet consensuel sur les avis des personnes interrogées.

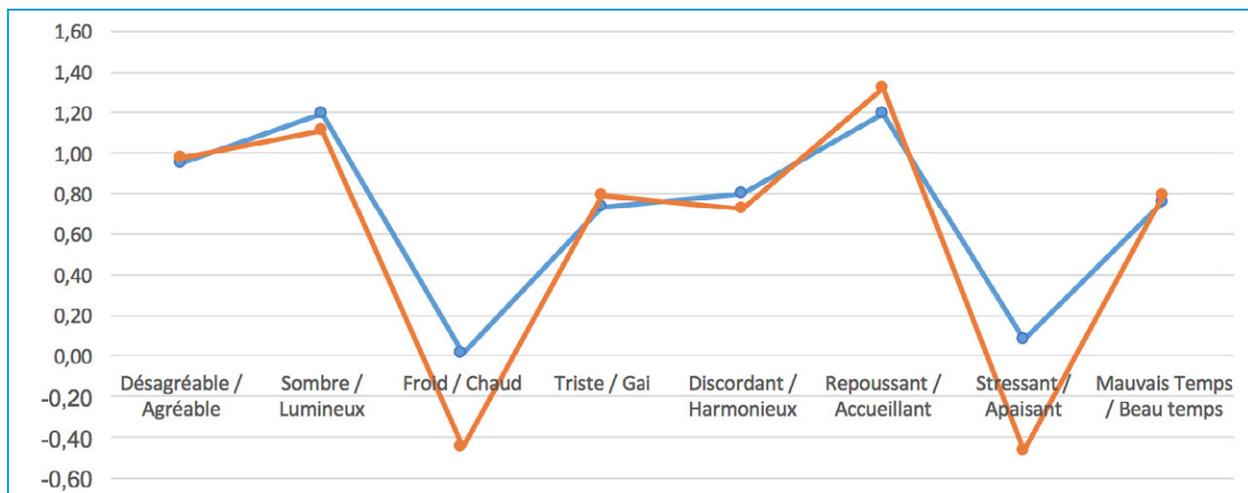
Moyennes des notes des hommes (orange) et des femmes (bleu) pour les images sans taches.



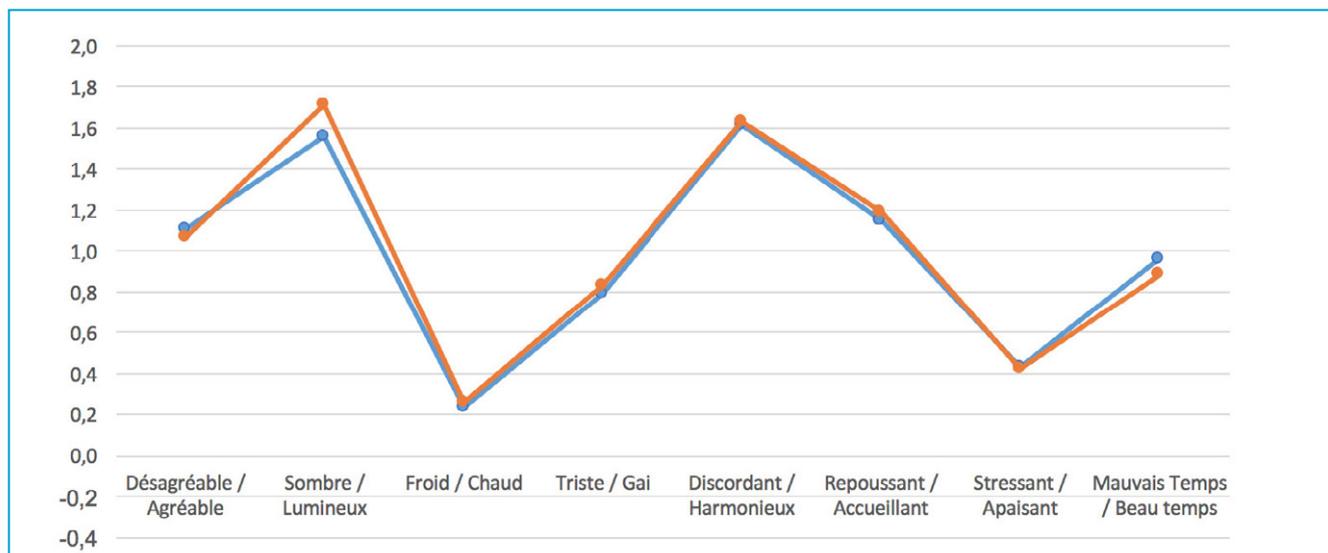
Moyennes des notes des hommes (orange) et des femmes (bleu) pour les images avec taches.



Moyennes des notes des moins de 30 ans (orange) et plus de 30 ans (bleu) pour les images sans taches.

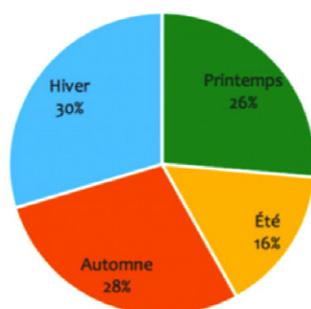
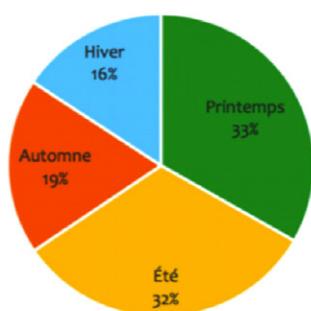


Moyennes des notes des moins de 30 ans (orange) et plus de 30 ans (bleu) pour les images avec taches.



Association au beau temps

L'association entre la tache solaire et le beau temps, comme nous venons de le voir, est un résultat remarquable des deux campagnes d'enquête. En effet, la différence dans l'évaluation augmente notablement, atteignant une valeur de 0,9. Cette tendance se confirme également lorsque nous étudions les réponses des enquêtés concernant la saison supposée de chacune des images. Les images avec taches solaires sont associées aux saisons de printemps et d'été pour 65% des enquêtés, tandis que pour les images sans taches solaires, l'association est moins systématique (42%).



Saisons estimées pour les images avec taches (en haut) et sans taches (en bas).

Les entretiens semi-directifs nous ont permis de remarquer que la connexion entre la tache solaire et la période estivale n'est pas seulement source de souvenirs agréables dans la parole des habitants. Les effets de la chaleur, cause indirecte de la lumière du soleil, est une des gênes principales soulignées par les interviewés, notamment l'été. Ainsi, neuf personnes ont parlé du recours aux protections par des rideaux, volets, tonnelles ou parasols : « on ne ferme pas le volet la nuit mais on le ferme le jour, ce qui est un peu bizarre, pour préserver la fraîcheur de la pièce ». Au même titre, les effets de la chaleur apportée par une tache solaire sont aussi source de nombreuses anecdotes chez les enquêtés : la fonte d'une cocotte de Pâques en chocolat située sur la table de la cuisine, les reflets éblouissants sur un écran, la révélation de la poussière ou de la fumée, ou encore la décoloration des tapis, meubles ou livres.

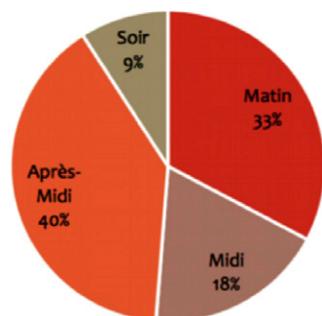
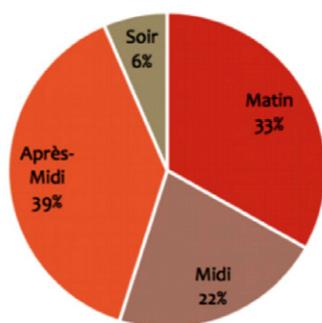
Ces constats confirment l'hypothèse de Nicole Phelouzat et Alain Corbin autour du lien entre le soleil et la saison estivale. En effet, ces images auraient pu être prises pendant des périodes diverses de l'année, rappelant par exemple l'effet agréable de l'entrée des rayons du soleil pendant l'automne ou l'hiver. Cependant, les réponses des enquêtés n'en font pas du tout été.

Suggestion du rapport à l'extérieur

Les entretiens semi-directifs indiquent que la présence de la tache lumineuse évoque un rapport direct avec l'extérieur. Dix-sept personnes interviewées ont estimé que la lumière provenait d'une fenêtre ou d'une baie vitrée. La forme de la tache solaire, les ombres projetées par les objets et la couleur de la lumière ont été soulignées par les interviewés comme des indices leur permettant d'imaginer l'existence d'une fenêtre associée à la tache.

Certaines personnes soulignent que la seule vue de la tache dans leur habitat leur permet de suivre l'évolution du soleil et leur fournit ainsi des données temporelles qui semblent très appréciées : « à partir du moment où tu vois l'ombre, enfin, la lumière qui tombe justement dans la pièce, je trouve qu'on a plus la sensation du temps [...] le fait de pouvoir voir ou pas la course du soleil... enfin, le ressentir ». La tache solaire permet aussi de deviner la météo sans voir l'extérieur : « en fonction de la luminosité [...] je sais s'il fait gris ou si c'est vraiment du soleil ou si c'est gris, s'il y a des nuages ».

La variation des taches lumineuses est aussi un sujet sur lequel les interviewés semblent détenir des souvenirs précis. Le changement d'inclinaison et d'emplacement de la tache solaire dans la pièce est fréquemment remarqué : « en hiver, comme le soleil est moins haut, je dirais qu'on a du soleil quasiment dans tout l'appartement ». C'est aussi le cas pour la couleur : « c'est plus la couleur du soleil quoi qui fait... comme elle est différente l'été et l'hiver ».



◀ Moment de la journée estimé avec taches (en haut) et sans taches (en bas).

Une impression générale et un rapport intuitif à la tache solaire

La figure ci-dessous montre les réponses des enquêtés sur le moment supposé où la photo a été prise dans la journée. Les images sont toutes principalement associées au matin ou à l'après-midi, moment où les rayons solaires rentrent plus profondément dans la maison. Des périodes de la journée plus courtes comme le midi et le soir, moins marquées par l'apport de lumière directe dans les espaces intérieurs, sont rarement citées. Il est donc intéressant de remarquer que les choix du moment de la journée et de la saison ne semblent pas être associés à la longueur de la tache solaire, alors que cette dernière pourrait être un indice important.

Cependant, les entretiens semi-directifs montrent que le discours des enquêtés peut devenir bien plus précis dès qu'il s'agit de questionner la forme de la tache solaire en comparaison aux taches observées chez eux. Les personnes interrogées ont notamment remarqué de manière intuitive le rapport entre la forme de la tache solaire et la fenêtre donnant lieu à la tache. L'entrée de lumière directe dans l'appartement est conditionnée par les découpes produites par les menuiseries, les allèges, les volets partiellement fermés. Selon l'un des interviewés : « mon appartement, il est plein sud et c'est des petites fenêtres assez hautes, l'allège doit m'arriver peut-être à ce niveau-là [...] ça se voit ça, dans les maisons [...] c'est le soleil qui rentre, réellement et qui marque ton espace ». Un autre interviewé, vivant dans des espaces plus largement vitrés, remarque la différence d'effet : « moi j'ai un immense salon avec des ouvertures sur trois côtés donc en fait ça ne fait pas marqué comme ça, ça fait plus diffus, ça fait pas un truc découpé, en fait j'ai pas de murs, c'est que des vitres moi ; du coup ça fait pas cet effet de découpe-là ».

4. Éléments de conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact d'une tache solaire sur la perception visuelle de l'espace domestique à travers des images. À cette fin, une évaluation globale de l'ambiance des environnements avec taches et sans taches a été réalisée au moyen de questionnaires par différentiel sémantique remplis par 200 personnes. De plus, les entretiens semi-directifs prenant appui sur un binôme d'images avec et sans taches nous ont permis de comprendre plus finement les résultats des enquêtes. Ce travail a été mené sur un échantillon divers avec des conditions climatiques variables dans la ville de Nantes.

Les résultats montrent que la présence de la tache solaire produit une convergence des avis des interviewés. De plus, nous avons observé que la présence de la tache fait tendre les jugements vers le côté positif. Autrement dit, la tache rend l'ambiance générale de la photo plus positive, ce qui fait que les images avec taches sont davantage appréciées.

L'étude nous montre que la tache solaire est associée à une sensation de luminosité, de chaleur, de gaieté et principalement de beau temps. De plus, nous avons remarqué que les taches solaires sont associées davantage à l'été et au printemps, résultat que nous pouvons mettre en parallèle avec le précédent. Les analyses des entretiens viennent confirmer ces résultats, l'ambiance générale des photos semble en effet être modifiée et elle apparaît plus positive puisque aucun adjectif négatif n'est utilisé pour décrire la photo avec taches lumineuses. Ceci confirme les hypothèses théoriques présentées au début du chapitre.

L'enquête montre que le binôme beau temps/mauvais temps est celui qui présente constamment le plus grand écart de valeurs dans l'évaluation. Ce résultat semble être confirmé par les questions concernant les saisons, les images avec taches sont majoritairement associées au printemps et à l'été.

La tache solaire crée un lien direct avec l'extérieur en amenant ainsi un élément de contexte supplémentaire à l'image. Ses effets permettent par exemple, sans voir l'extérieur de l'habitat, de pouvoir bénéficier de données météorologiques et temporelles, puisque l'intensité et la couleur de la tache varient selon le moment de la journée et la saison. Certains des artistes présentés dans la partie précédente de ce rapport explorent cette illusion de la lumière naturelle.

Enfin, l'expérience de la tache solaire semble marquer les espaces du chez-soi par des moments agréables et par des événements ou anecdotes plus imprévus. On remarque par exemple que les taches lumineuses semblent plus appréciées dans des périodes plus fraîches, comme en hiver, où elles permettent d'apporter de la chaleur supplémentaire à l'intérieur de l'habitat. En été au contraire, les taches peuvent parfois se révéler gênantes et la chaleur qu'elles induisent est souvent fuie. Une gêne visuelle peut également se manifester lorsque l'on désire regarder la télévision ou travailler sur l'ordinateur et qu'une tache lumineuse apparaît sur l'écran.

L'expérience de la tache solaire semble marquer les espaces du chez-soi par des moments agréables et par des événements ou anecdotes plus imprévus.

ANNEXE

Bibliographie générale

Banham, R. (1969). *The Architecture of the Well-Tempered Environment*. Chicago: The University of Chicago Press.

Baroncini, C., Chella, F., et Zazzini, P. (2010). "Numerical And Experimental Analysis Of The 'Double Light Pipe'. A New System for Daylight Distribution in Interior Spaces". *International Journal of Low Carbon Technologies* 3(2): 110-125.

Bigando, E. (2013). « De l'usage de la photo elicitation, interview pour appréhender les paysages du quotidien : retour sur une méthode productrice d'une réflexivité habitante ». *Cybergeo: European Journal of Geography* [Online]. Consulté le 16/05/2016. <http://journals.openedition.org/cybergeo/25919>

Boubekri, M. (2008). *Daylighting, Architecture and Health. Building Design Strategies*. Oxford: Routledge.

Butti, K., et Perlin, J. (1980). *A Golden Thread: 2500 years of architecture and technologies*. Michigan: Cheshire Books.

Canazei, M., Laner, M., Staggl, S., Pohl, W., Ragazzi, P., Magatti, D., Martinelli, E., et Di Trapani, P. (2016). "Room- and Illumination-Related Effects of an Artificial Skylight". *Lighting Research & Technology* 48(5): 539-58.

Carter, D.J. (2002). "The Measured and Predicted Performance of Passive Solar Light Pipe Systems". *Lighting Research & Technology* 34: 39-52.

Carter, D.J. (2014). "Tubular daylight guidance systems". *Lighting Research & Technology* 46: 369-387.

Carter, D.J., et Al Marwaee, M. (2009). "User Attitudes Toward Tubular Daylight Guidance Systems". *Lighting Research & Technology* 41: 71-88.

Colladon, J.D. (1842). « Sur les réflexions d'un rayon de lumière à l'intérieur d'une veine liquide parabolique ». *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 15: 800-802

Corbin, A. (2013). *La douceur de l'ombre: l'arbre, source d'émotions, de l'Antiquité à nos jours*. Paris: Fayard.

Dardel, E. (1990) [1952]. *L'Homme et la Terre: nature de la réalité géographique*. Paris: Éditions du CTHS.

Derlande, J., et Dumortier, D. (2015). *Amélioration par l'éclairage de l'acceptabilité des espaces souterrains*. Rapport de recherche Projet National Ville 10D Tranche 2. Lyon: École Nationale de Travaux Publics de l'État.

Drozd, C., et Siret, D. (2013). *La conception des ambiances lumineuses dans les projets d'extension de maisons individuelles*. Les chantiers Leroy Merlin Source.

Drozd, C., Mahé, K., Requena-Ruiz, I., et Siret, D. (2016). *L'accompagnement des projets d'auto-réhabilitation par les magasins de bricolage. État des lieux et prospective pour l'amélioration énergétique de l'habitat en milieu rural*. Les chantiers Leroy Merlin Source.

ESMM (1931). "Depthscrapers Defy Earthquakes". *Everyday Science and Mechanics Magazine*. Novembre 1931: 646 et 708.

Fernandez, P. (2012). *La perception des environnements lumineux de chambres d'hôtel. Effets de l'éclairage, de l'usage et des caractéristiques individuelles sur le jugement d'appréciation en situation réelle*. Thèse de doctorat, Médecine humaine et pathologie, Université Claude Bernard - Lyon I.

Freyheit, S. (2009). *La luminothérapie et ses principales applications*. Thèse de doctorat, Faculté de pharmacie, Université Henri Poincaré - Nancy 1.

Garcia-Hansen, V. (2006). *Innovative Daylighting Systems for Deep-Plan Commercial Building*. Thèse de doctorat, School of Design, Queensland University of Technology.

Garcia-Hansen, V., et Edmonds, I. (2003). "Natural illumination of deep-plan office building: light pipe strategies". Congrès *ISES Solar World Congress*, Goteborg (Suède), 14-19 Juin 2003.

Garcia-Hansen, V., Isoardi, G., Miller, E., et McLellan, G. (2010). "Perception of Daylight Quality Delivered by Light Transport Systems". Congrès *CIE 2010 Lighting Quality & Energy Efficiency*, Vienne (Autriche), 14-17 Mars 2010.

ANNEXE

Golden, R.N., Gaynes, B.N., Ekstrom, R.D., Hamer, R.M., Jacobsen, R.M., Suppes, T., Wisner, K.L., et Nemeroff, C.B. (2005). "The efficacy of light therapy in the treatment of mood disorders: a review and meta-analysis of the evidence". *American Journal of Psychiatry* 162: 656-662.

Graham Bell, A. (1880). *Apparatus for Signaling and Communicating, Called Photophone*. Brevet U.S. Patent Office US235199A.

Granger, C. (2013). « Le soleil ou la saveur des temps insoucieux ». In : **Corbin, Alain** (éd.). *La pluie, le soleil et le vent. Une histoire de la sensibilité au temps qu'il fait*. Paris : Flammarion. p. 37-68.

Granger, C. (2004). « (Im)pressions atmosphériques. Histoire du beau temps en vacances ». *Ethnologie française*, 2004/1 Vol. 34, p. 123-128. DOI 10.3917/ethn.041.0123

Grapin, P. (2017). « Quatre questions au recteur Gérard-François Dumont. Note d'analyse macroéconomique ». *AssetFi et Bipe*, 2017, p. 8-11. Disponible en ligne : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01518949>

Hanneborg, O.B.H. (1901). *Apparatus for Transmitting Sunlight to Basements or Other Stories*. Brevet U.S. Patent Office US668404.

Hauge, B. (2015). "Lives under the Sun". *The Senses and Society* 10(1) : 71-91.

Hecht, J. (1984). "Fiber Optics Calls Up The Past". *New Scientist*, 12 janvier 1984 : 12-13.

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

Heerwagen, J.H. (1990). "Affective Functioning, 'Light Hunger,' and Room Brightness Preferences". *Environment and Behavior* 22(5) : 608-635.

Jeury, M. (2007). *La vallée du temps profond*. Lyon : Les moutons électriques.

Johnston, W.K. (2004), "Epochs in Endourology. The Birth of Fiber optics from 'Light Guiding'". *Journal of Endourology* 18(5) : 425.

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

La Soudière (de), M. (1999). *Au bonheur des saisons. Voyage au pays de la météo*. Paris : Grasset.

La Soudière (de), M., Tabeaud, M. (2009). « Introduction. Le ciel comme terrain ». *Ethnologie française*, 2009/4 (Vol. 39), p. 581-585. DOI 10.3917/ethn.094.0581

Laurent, A. (1967). « Le thème du soleil ». *Communications* 10 : 35-50.

Makus, T.A. (1967). "The function of windows : A reappraisal". *Building Science* 2 : 97-121.

Mandoul, T. (2012). « Climat(s) : nouveau paradigme pour l'architecture ? ». *Raison publique* 2012/2 (N° 17), p. 141-161. <https://www.cairn.info/revue-raison-publique1-2012-2-page-141.htm>.

Manfroid, J. (2013). « Les miroirs ardents ». *Journal de la Société Astronomique de Liège* 75 : 33-35.

Maxey, L.C., Lapsa, M., Boudreaux, P., Earl, D., Morris, J., et Bunch, T. (2008). *Hybrid Solar Lighting: Final Technical Report and Results of Field Trial Program*. Rapport d'études pour California Energy Commission. Oakridge : Oakridge National Laboratory.

Météo France. (2018). *Janvier 2018 : le plus doux depuis 1900 (Bilan provisoire au 23 janvier 2018)*. Publié en ligne le 24 janvier 2018 : <http://www.meteofrance.fr/actualites/58383502-janvier-2018-le-plus-doux-depuis-1900>

Moreno, P. (2011). *La représentation des ambiances architecturales et urbaines dans les supports de promotion des projets : analyse du rôle des personnages*. Mémoire de master STEU, École Centrale de Nantes, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

Nair, M.G., Ramamurthy, K., et Ganesan, A.R. (2013) "Classification of Indoor Daylight Enhancement Systems". *Lighting Research & Technology* 46(3) : 245-267.

ANNEXE

- Nilsson, A.M., Jonsson, J.C., et Roos, A.** (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 : 172-179.
- Orians, G.H., et Heerwagen, J.H.** (1992). "Evolved Responses to Landscapes". In : **Barkow, J., Cosmides, L., et Tooby, J.** (eds.) *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture* (pp. 555-579). New York: Oxford University Press.
- Ory, P.** (2008). *L'invention du bronzage*, Paris, Édition Complexe.
- Paroncini, M., Calcagni, B., et Corvaro, F.** (2007) "Monitoring of a light-pipe system". *Solar Energy* 81(9) : 1180-1186.
- Pétonnet, C.** (1989). « Entre nostalgie et prospective : le temps présent ». In : **Verdié, M.** *L'état de la France et de ses habitants* (pp. 46-50). Paris : La Découverte.
- Phelouzat-Perriquet, N., et de La Soudière, M.** (2007). « Approche sociologique de la dépression saisonnière hivernale (partie 1) ». *PSN. Psychiatrie, sciences humaines, neurosciences* 5(3) : 153-161.
- Phelouzat, N.** (2010). « Beaux temps et bonnes humeurs ». *Corps* 8(1) : 49-56. DOI 10.3917/corp.008.0049
- Ragon, M.** (1973). « Urbanisme et énergies solaires ». *Revue Urbanisme* 139 : 102-106.
- Rosemann, A., Cox, G., Friedel, P., Mossman, M., et Whitehead, L.** (2008). "Cost-Effective Controlled Illumination Using Daylighting and Electric Lighting in a Dual-Function Prism Light Guide". *Lighting Research & Technology* 40 : 77-88.
- Rottier G.** (1972). « Lumiduc Architecture ». *Coopération Méditerranéenne pour l'Énergie Solaire - Bulletin* 22 : 75-81.
- Serres, L.** (1997). *Étude de l'impact d'une perturbation thermique locale de type tache solaire. Influence sur le confort thermique*. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- Siret D.** (2013). « Les sensations du soleil dans les théories architecturales et urbaines. De l'hygiénisme à la ville durable ». In : **Beck, R., Krampl, U., et Retailaud-Bajac, E.**, (eds.) *Les cinq sens de la ville du Moyen Age à nos jours*. Tours : Presses universitaires François-Rabelais (PUFR).
- Tabeaud, M.** (2017). « À la recherche du climat idéal ». *Communications*, 2017/2 (n° 101), p. 21-32. DOI 10.3917/commu.101.0021
- Twarowski, M.** (1967). *Soleil et architecture*. Paris : Dunod (traduction de l'édition originale, Varsovie : Arkady, 1962).
- Urbain, J-D.** (2014). *Au Soleil : naissance de la Méditerranée estivale*. Paris : Payot.
- Vigier, T.** (2015). *Suggestion et perception des ambiances climatiques dans les environnements virtuels urbains*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes Angers Le Mans, École nationale supérieure d'architecture de Nantes.
- Wheeler, W.** (1881). *Apparatus for Lighting Dwellings or Other Structures*. Brevet U.S. Patent Office US247229.
- Wilson, L.M.** (1972). "The effects of outside deprivation on a windowless intensive care unit". *Archives of Internal Medicine* 130 : 225-226.
- Zhang, X., Muneer, T., et Kubie, J.** (2002). "A Design Guide For Performance Assessment Of Solar Light-Pipes". *Lighting Research & Technology* 34(2) : 149-169.

Créé par LEROY MERLIN en 2005, LEROY MERLIN Source réunit des chercheurs, des enseignants et des professionnels qui ont accepté de partager leurs savoirs et leurs connaissances avec les collaborateurs de l'entreprise.

Au sein de trois pôles – Habitat et autonomie; Habitat, environnement et santé; Usages et façons d'habiter – ils élaborent des savoirs originaux à partir de leurs pratiques, réflexions et échanges.

Ils travaillent de manière transversale au sein de chantiers de recherche dont les thèmes sont définis annuellement par la communauté des membres des groupes de travail, en dialogue avec les axes stratégiques de l'entreprise.

Les résultats de ces chantiers sont transmis aux collaborateurs de LEROY MERLIN et aux acteurs de la chaîne de l'habitat au travers de journées d'études, d'interventions en interne et de prises de parole dans le cadre des Assises de l'habitat organisées par l'entreprise.

Ces collaborations actives donnent lieu à des publications à découvrir sur le site de **LEROY MERLIN Source**.

www.leroymerlinsource.fr

contact.leroymerlinsource@leroymerlin.fr

 [@LM_Source](https://twitter.com/LM_Source)

