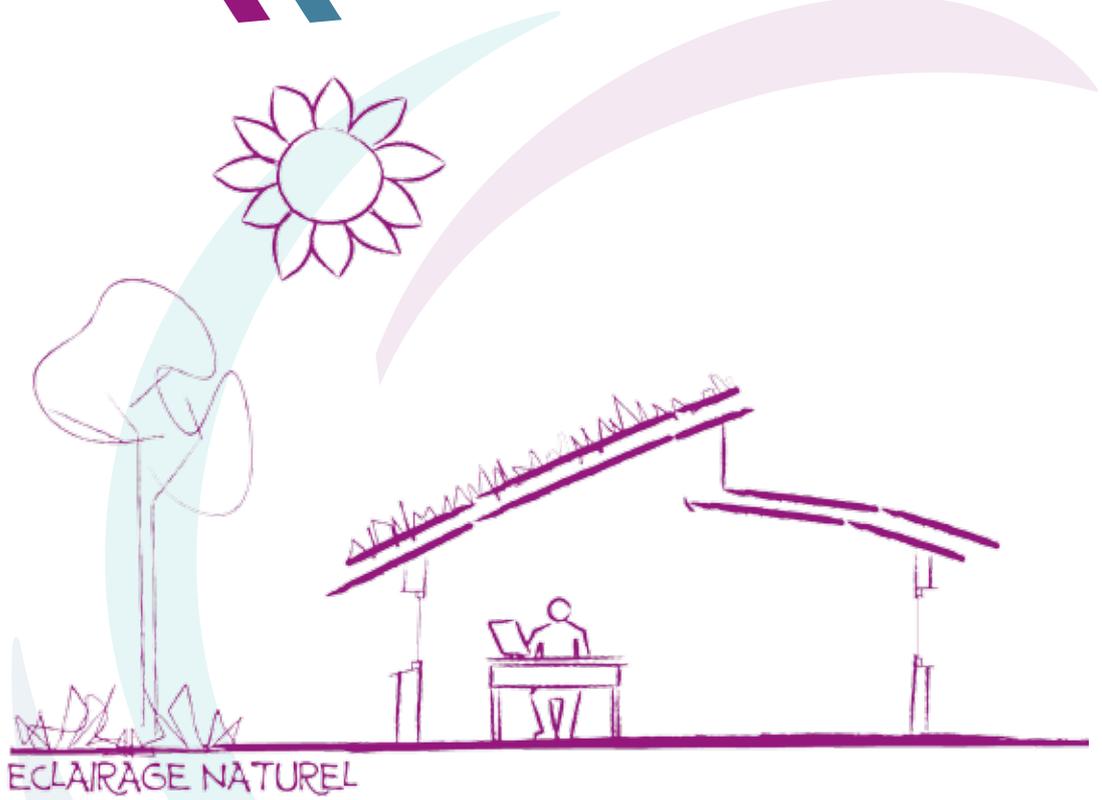


L'éclairage naturel



ECLAIRAGE NATUREL



SOMMAIRE

ENJEUX ET CONTEXTE	5
ARCHITECTURE ET LUMIÈRE NATURELLE	7
CARACTÉRISATION DE LA LUMIÈRE NATURELLE	11
AMBIANCES LUMINEUSES	19
LA PRÉDÉTERMINATION DE L'ÉCLAIRAGE NATUREL	27
RECOMMANDATIONS, RÉGLEMENTATIONS ET CERTIFICATIONS ENVIRONNEMENTALES	37
SOLUTIONS POUR BIEN CONCEVOIR L'ÉCLAIRAGE NATUREL D'UN BÂTIMENT	45
EXEMPLES CONCRETS DE MISE EN ŒUVRE	67

Pilotage : Pour l'ICEB, Yannick Sutter (Le Sommer Environnement)

Rédaction : ouvrage réalisé à la suite d'un groupe de travail de l'ICEB, coordonné par Yannick Sutter (Le Sommer Environnement) avec les contributions de Hélène Michelson (TRIBU), Ivan Fouquet (Atelier BAM), Jean-François Autissier (ALTO Ingénierie), Ljubica Mudri et Jean-Dominique Lénard (De Luminae), Ulrich Sanson (ALTO Ingénierie)

Coordination éditoriale : Pascale Gorges, Pascale Céron ARENE Île-de-France

Contributions de : Michel Le Sommer (Le Sommer Environnement) et Christine Lecerf (AILTER)

Exécution graphique : Caroline Rampon - caroline.rampon.infographiste@gmail.com

Illustrations à main levée : Yvan Fouquet (atelier BAM)

Date d'impression : Mars 2014, imprimé sur du papier 100 % recyclé éco-label européen

Imprimeur : Prestaprint

ISBN EAN : 978-2-911533-12-9



Nous avons le plaisir de présenter ce guide au nom de l'ARENE Île-de-France et de l'ICEB. Troisième guide dans la série « Bio-tech », celui-ci est consacré à l'éclairage naturel dans les constructions. Il s'adresse à tous les acteurs de la filière de la construction pour lesquels les outils proposés permettront de mieux comprendre et maîtriser les enjeux de l'éclairage naturel. Concevoir des espaces confortables à l'heure où les bâtiments passifs ou à énergie positive se multiplient, telle est l'ambition du propos.

Ce guide a donc été conçu pour répondre à l'essentiel des questions architecturales et techniques qui se posent sur l'éclairage naturel. Après un rapide historique de la lumière dans l'architecture, il présente les caractéristiques de la lumière et des ambiances lumineuses, les effets de la lumière sur le confort et la santé. Il examine les différents outils de calcul de la lumière naturelle et présente de multiples solutions d'optimisation afin de guider les choix.

Des analyses comparatives – réalisées à partir de résultats d'opérations ou de simulations effectuées par le groupe de travail qui a participé à la rédaction de ce guide – suivies de recommandations devraient orienter vers les solutions les plus pertinentes pour les futures opérations ou pour adapter un outil existant.

Accéder à la lumière naturelle n'est pas simplement une contrainte, c'est aussi une source de bien-être. Traiter cette question fournit l'occasion d'un dialogue entre le maître d'ouvrage et toutes les parties prenantes au moment du programme et de la conception. Cela permet au futur usager de maîtriser son environnement. Enfin, c'est un moteur d'innovation pour les équipes de maîtrise d'œuvre.

La conception de l'éclairage naturel d'un bâtiment est indissociable des questions de performance thermique et de confort d'été qui peuvent générer des exigences contradictoires. C'est là où la capacité de synthèse et de créativité des architectes et des bureaux d'études trouve toute sa place, et où se fabrique l'architecture écoresponsable de demain. Avec cet ouvrage, l'ARENE Île-de-France et l'ICEB espèrent pouvoir y contribuer.

Marc Lipinski
Président de l'Arène Île-de-France

Christine Lecerf
Présidente de l'ICEB

&

Michel Le Sommer
Vice-président de l'ICEB



Enjeux et contexte

Les enjeux

Les enjeux liés à la lumière naturelle sont nombreux. On peut évoquer ses impacts sur la santé et le bien-être, ou encore sur les consommations d'éclairage artificiel, de chauffage et de climatisation.

Au XXI^e siècle, de nouveaux enjeux sont apparus sous la forme des performances environnementales du cadre bâti dans le but de limiter les impacts environnementaux tout en optimisant le confort et la santé des usagers. Les premières démarches environnementales mises en œuvre ont proposé des indicateurs et des niveaux de performances qui ont ensuite été intégrés par les référentiels de certification environnementale.

La plupart des nouveaux projets de construction ou de réhabilitation en Île-de-France mettent en œuvre une démarche environnementale certifiée ou non, par un ou plusieurs organismes. Bien que ces démarches n'aient aucun caractère obligatoire, les maîtres d'ouvrage peuvent choisir de s'y plier pour des raisons de compétitivité du marché et/ou par motivation pour le développement durable. Ces démarches favorisent globalement l'utilisation de la lumière naturelle et poussent la conception à garantir des niveaux optimaux d'éclairement et d'uniformité en lumière naturelle, à proposer des accès aux vues ou encore à mettre en place un contrôle solaire optimisé. La conception doit ainsi trouver un compromis entre les critères de confort lumineux et thermique ainsi que des objectifs énergétiques de plus en plus exigeants.

Dans les bâtiments tertiaires, la part de l'éclairage artificiel peut représenter jusqu'à 40 % de l'électricité consommée [ADEME, 2007] [GREENLIGHT, 2002] ; d'où l'importance de la

maîtrise de l'éclairage naturel dans la conception bioclimatique. Les effets moins aisément quantifiables de la lumière naturelle sur le bien-être, la santé et la productivité sont également à prendre en considération.

Le contexte urbain

La densité urbaine dans laquelle s'inscrit un projet influence considérablement le potentiel d'utilisation de la lumière naturelle. La région Ile-de-France présente une forte densité urbaine rendant parfois difficile l'optimisation de la pénétration de la lumière naturelle.

À ce jour, les démarches de certification environnementale ne tiennent pas compte de la densité urbaine pour l'application des exigences relatives à l'éclairage naturel. Par conséquent les bâtiments situés en contexte urbain dense auront plus de difficultés à être conformes que ceux sur un site dégagé. Il s'agira donc d'effectuer un travail d'optimisation en plaçant, par exemple, les postes de travail à proximité des baies, en spécifiant des facteurs de réflexion des parois élevés afin d'augmenter les réflexions lumineuses ou encore de préconiser des solutions d'éclairage zénithal ou second jour pour bénéficier d'un accès à la lumière naturelle en fond de pièce ou dans les circulations.

Le climat lumineux du site influence le potentiel en éclairage naturel et donc la conception. Dans cet ouvrage, nous avons considéré le climat lumineux de l'Île-de-France pour les divers résultats présentés. Les conclusions sont par conséquent valables pour la région Île-de-France et ne peuvent être transposées à d'autres climats sans un approfondissement préalable.



Architecture et lumière naturelle

Le rapport de l'architecture à la lumière du jour marque souvent les moments décisifs de son évolution. Le rôle de la lumière est déterminant dans la conception de l'espace, sa perception, sa symbolique. Une brève historiographie de l'antiquité à nos jours, permet de comprendre le sens de cette relation.

Antiquité et Moyen-âge

Durant l'antiquité, le seul moyen de faire entrer la lumière naturelle à l'intérieur d'un bâtiment était à l'aide de percements.

La relation architecture et lumière est exemplaire avec le Panthéon de Rome (1^{er} siècle av. J-C) dont le zénith ouvert d'un cercle de lumière ajoute à la magie du lieu. Cet oculus sommital de 8,7 m de diamètre est l'unique source de lumière naturelle. Selon le type de ciel, l'oculus projettera un ovale de lumière net et découpé si le ciel est clair ou bien l'ovale sera moins découpé voire complètement diffus si le ciel est

couvert et selon la couverture nuageuse. La combinaison du type de ciel, de l'heure et du jour de l'année rend chaque instant à l'intérieur de l'édifice visuellement unique.

L'architecture religieuse réutilisera ce symbole dans le rapport très contrasté

entre la masse construite, épaisse et sombre et les rayons lumineux qui traversent les fins percements des abbayes romanes, comme une lumière divine venant briser les ténèbres. Au Thoronet (XII^e siècle), les rares et étroites

fenêtres percent des murs de 1,60 à 1,80 mètre d'épaisseur. La lumière provençale donne vie à son architecture dépouillée, elle sculpte la pierre. Elle s'intensifie aux heures extrêmes du soleil, le levant et le couchant, coïncidant avec les heures les plus importantes des offices : les laudes et les vêpres.



Église abbatiale : l'abbaye du Thoronet (Var) – Photo domaine Public

Le moyen-âge voit par ailleurs apparaître le développement du vitrail, des petits morceaux de verre qui sont soudés entre eux. Principe qui est souvent utilisé pour réaliser des motifs.

La découverte de la voûte en ogive, de la croisée d'ogive et de l'arc-boutant permet l'allègement des structures et la construction des cathédrales gothiques. L'architecture gothique établit alors un rapport inédit à la lumière naturelle : l'espace des cathédrales est inondé de lumière. Celle-ci incarne une nouvelle métaphysique, symbole de clarté, d'illumination, d'intelligibilité, la vera lux divine de la connaissance par opposition aux ténèbres, à l'ignorance et à l'occultisme.



Oculus du Panthéon de Rome - © VisualHugo licence Creative Commons

Siècle des Lumières

Durant la période des Lumières (dont l'impact dépasse le domaine de l'architecture), la Raison, la Science remplacent la vérité divine pour éclairer l'humanité. Elles se matérialisent en architecture par les jeux d'optiques, de perspectives, de miroirs, de rythme et de trompe l'œil.

Au XIV^e siècle apparaissent notamment les feuilles de verre planes créées par Philippe Cacqueray et la première verrerie à vitre naît à Bézu-la-Forêt dans l'Eure.

Connu des Romains, l'usage du verre à vitre était jusqu'alors peu répandu dans l'architecture civile. Les baies étaient fermées par des moyens rudimentaires : volets de bois, toiles cirées, peaux ou papiers huilés protégés de grillages et peu favorables à l'éclairage naturel.

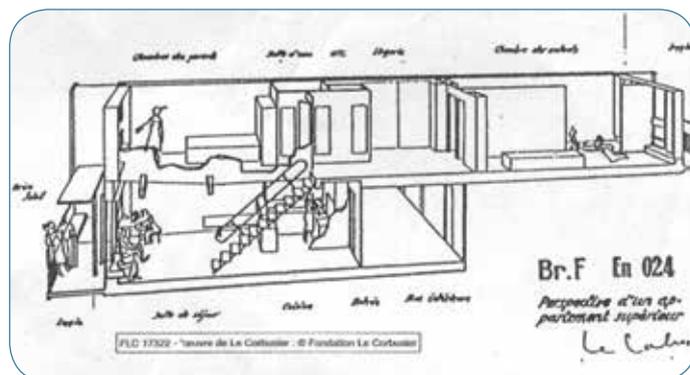
Au siècle des Lumières, on invente les premières tables de coulage de vitrage qui permettent de produire des miroirs et vitrages transparents de grandes dimensions. La Manufacture royale de glaces de miroirs est fondée en 1665 pour réduire la dépendance de la France aux productions de verre vénitiennes. Louis Lucas de Nehou y met au point le coulage des glaces et entre 1678 et 1684, la manufacture participe à la construction de la Galerie des Glaces du château de Versailles. En 1693, elle s'établit en Picardie à Saint-Gobain.

Période moderne

L'époque moderne bénéficie des progrès techniques de l'industrie verrière. Les sheds des ateliers industriels apparaissent dès la première moitié du XIX^e siècle sur les toitures des fabriques de textile en Angleterre. Les nouveaux modes de fabrication et de laminage produisent des vitrages de grandes dimensions, et rendent possible la construction de grandes verrières comme celles du Crystal Palace à Londres (1851), et du Grand Palais à Paris (1900).

Le progrès technique permet aussi à la fée électricité d'apporter de l'éclairage artificiel. En 1879, Thomas Edison développe l'ampoule électrique. L'architecture à la fois se libère des besoins d'éclairage naturel et s'appauvrit par la disparition des multiples formes imaginées pour y répondre : lucarne, lanterneau, jour de souffrance, shed, puits de lumière, verrière, coupole vitrée...

Durant la première moitié du XX^e siècle, Le Corbusier prône le principe de lumière naturelle en continu. Dans ses « cinq points d'une architecture moderne » (1927), le Corbusier propose la fenêtre en longueur rendue possible par la construction en acier et en béton armé. Opposées aux fenêtres classiques verticales, elles améliorent l'éclairage naturel avec une radicalité presque hygiéniste. Pourtant dès 1923, il donne une définition intemporelle de l'architecture comme le « jeu savant, correct et magnifique des volumes sous la lumière. »



Les appartements des Cités Radieuses construites au début des années 1950 sont souvent traversants, plutôt profonds et étroits qui offrent un accès à la lumière naturelle dans la plupart des espaces.

Un appartement d'une Cité Radieuse conçue par Le Corbusier
© Fondation Le Corbusier

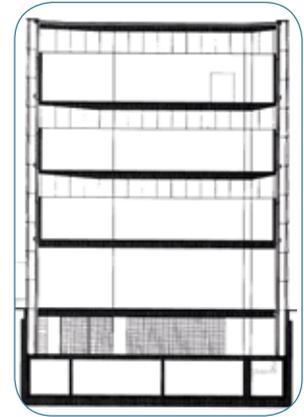
Architecture contemporaine

L'architecture contemporaine joue avec la lumière naturelle de multiples manières. Pour Louis Kahn (1901-1974), la lumière ajoute à la monumentalité des espaces, il définit l'architecture comme « le seuil entre le silence et la lumière » : *“Même une pièce qui doit être obscure a besoin au moins d'une petite fente pour qu'on se rende compte de son obscurité. Mais les architectes qui aujourd'hui dessinent des pièces ont oublié leur foi en la lumière naturelle. Assujettis à la facilité d'un interrupteur, ils se contentent d'une lumière statique et oublient les qualités infinies de la lumière naturelle grâce à laquelle une pièce est différente à chaque seconde de la journée.”* [Louis Kahn, *Silence et Lumière*, Editions du Linteau, 1996].

De même, les fentes de lumières sont devenues une figure habituelle de l'architecture de Tadao Ando (Maison Azuma, 1976, Koshino, 1979, Église de Lumière, 1987...).

Peter Zumthor utilise le même effet de contraste au Kolumba Kunstmuseum (Cologne, Allemagne). La lumière pénètre dans un filtre créé par de légers décalages des briques de la façade. Zumthor a su également utiliser les nouvelles technologies de matériaux translucides (de type polycarbonate) tout comme nombre de ses confrères : Herzog & De Meuron (Laban Dance Centre), Holl (Ambassade Suisse), Lacaton & Vassal (École d'Architecture de Nantes)...

À Bregenz, le musée que Zumthor a réalisé est un bel exemple de réussite d'intégration de la lumière naturelle dans une conception contemporaine. Le bâtiment est constitué d'un monolithe de trois étages dont la peau en écailles de verre dépoli diffuse la lumière naturelle dans le bâtiment. Celle-ci ne pénètre pas directement les salles d'exposition dont les parois sont opaques, elle rentre dans un épais plenum en faux-plafond, entre chaque étage, s'y reflète pour être diffusée par le plafond des salles. L'effet y est particulièrement saisissant.



Kunsthhaus Bregenz, Arch. : Peter Zumthor
Photo © G. Morin, Bregenz, juin 2009 et coupe sur le bâtiment

La vision de l'ICEB sur l'architecture durable de demain

Le XXI^e siècle impose des exigences plus fortes aux architectes et aux autres acteurs de la construction, en matière de respect de l'environnement et de lutte contre le dérèglement climatique. Ils doivent composer avec des exigences énergétiques de plus en plus contraignantes pour arriver à des bâtiments zéro énergie en 2020 pour la France.

Ces contraintes amènent de plus en plus les maîtres d'œuvre à être conscients du triptyque lumière naturelle / surchauffes / déperditions. Il s'agit d'optimiser l'équilibre entre la performance thermique de l'enveloppe (Ubat, Facteur solaire, confort thermique) et sa performance en éclairage naturel (FLJ, transmission lumineuse, confort lumineux) en tenant compte des exigences programmatiques spécifiques à l'opération. Ces exigences peuvent se baser sur des retours d'expérience ainsi que des exigences réglementaires, des certifications environnementales, des recommandations locales ou divers garde-fous.

Ces exigences offrent également de nouvelles opportunités d'inventions architecturales.



Caractérisation de la lumière naturelle

La lumière naturelle est la partie visible du rayonnement énergétique provenant du soleil. Sa disponibilité dépend de nombreux paramètres dont la position du soleil et la couverture nuageuse. La distribution de la lumière naturelle provenant du soleil et de la voûte céleste peut être modélisée par différents types de ciel.

Les grandeurs photométriques permettent de quantifier la lumière naturelle reçue par une surface : l'éclairement, et l'impression visuelle produite : la luminance. L'éclairement est la grandeur la plus utilisée même si elle n'est pas toujours la plus adaptée pour caractériser les ambiances lumineuses.

Les objets et matériaux absorbent, réfléchissent ou transmettent la lumière naturelle de manière plus ou moins sélective. C'est notamment au travers de ces processus que sont définies les couleurs et les luminances perçues par l'œil.

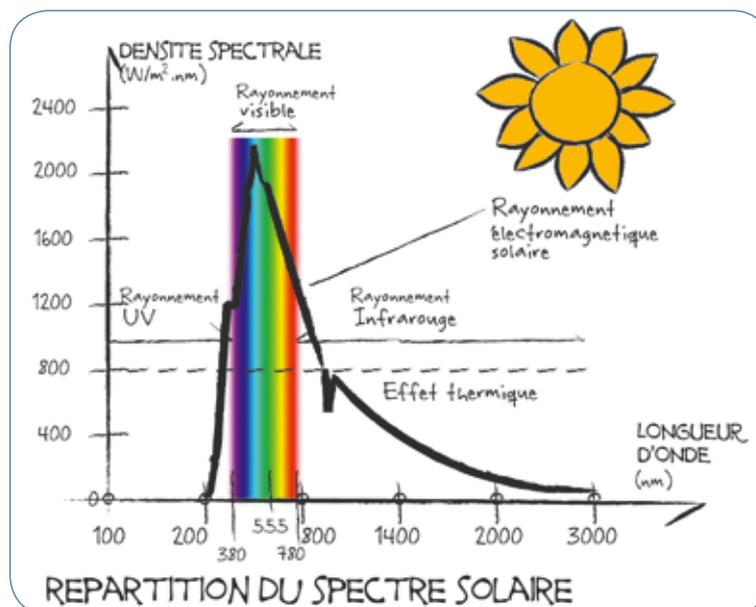
Origine et caractérisation de la lumière naturelle

La source de lumière naturelle : le rayonnement solaire visible

La lumière naturelle est la partie visible du rayonnement électromagnétique provenant du soleil. Les longueurs d'onde de son spectre s'étendent de 380 à 780 nanomètres pour la vision diurne.

La composition du rayonnement énergétique global est variable sur la planète et au cours de l'année, elle varie également selon les sources. En première approximation, on peut dire que la répartition est d'environ la moitié de rayonnement visible et l'autre moitié de non-visible. Néanmoins, on peut trouver des données chiffrées :

- 51 % de visible et 49 % de non-visible. [Association Française de l'Éclairage, 1983]
- 48 % de visible et 52 % de non-visible. [Wikipedia]

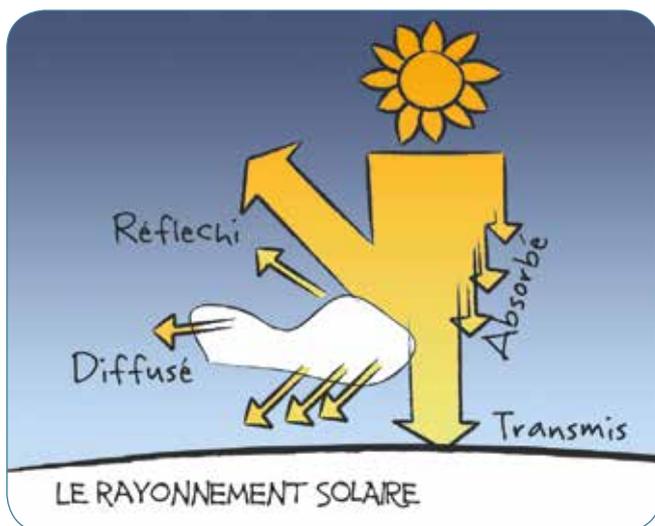


Le non-visible se décompose entre infra-rouge et ultra-violet. 6 % d'UV et 43 % d'IR pour l'AFE, 1 % d'UV et 51 % d'IR pour Wikipedia.

La source de lumière naturelle qui éclaire notre planète est le soleil. Toutefois, la voûte céleste, qui reçoit cette lumière, agit comme un filtre/diffuseur pour une part importante de ce flux direct du soleil. Elle se comporte alors comme un large luminaire de lumière naturelle. En éclairage naturel, on considère deux sources, le soleil (rayonnement direct) et le ciel (rayonnement diffus). Les luminances, les éclairagements et la répartition spectrale varient dans la journée en fonction de la position du soleil, mais également de la couverture nuageuse qui est un élément aléatoire.

Flux direct et diffus

Lorsqu'ils traversent l'atmosphère, une partie des rayons du soleil est réfléchi dans l'espace. Une autre partie absorbée par l'atmosphère et les nuages ne parviendra pas jusqu'à la surface terrestre. Une dernière partie, après de nombreuses réflexions dans l'atmosphère, produira le flux diffus de lumière naturelle. Si la couverture nuageuse est faible, une partie du flux lumineux du soleil nous parviendra directement, ce rayonnement constitue le flux direct de la lumière naturelle.



Ainsi la lumière naturelle perçue sur la Terre ne dépend pas seulement du soleil, mais également de la composition de l'atmosphère et de la couverture nuageuse.

Le type de ciel peut être caractérisé en fonction des variations astronomiques et météorologiques. Une classification des différents types de ciel à été développée pour représenter les différents ciels réels.

Les types de ciel

Un type de ciel est caractérisé par la répartition des luminances sur la voûte céleste en fonction de la position du soleil et de la répartition des nuages.

Deux grands types de ciel sont à distinguer : ceux où le soleil est visible et ceux où il ne l'est pas. On parle ainsi de ciels clairs et de ciels couverts. Lorsque le soleil est alternativement visible et non-visible, on parle de ciel intermédiaire. Il s'agit d'un ciel présentant une couverture nuageuse plus ou moins dense et éparse, des portions de voûte céleste sans nuage et le soleil visible par intermittence.

Il existe des modèles de ciel qui permettent de reproduire analytiquement la répartition de ciels réels.

Les ciels réels

Il existe une infinité de types de ciel, leur caractérisation est souvent complexe car aléatoire.



Exemples de différents types de ciel – Source : ENTPE

Les mesures montrent que l'éclairage horizontal extérieur varie selon les types de ciel et selon le lieu, dans nos latitudes :

- entre moins de 5 000 lux l'hiver et plus de 40 000 lux l'été sous ciel couvert,
- au delà de 100 000 lux en été sous ciel clair.

La fréquence d'occurrence des différents types de ciel réel (clair, couvert ou intermédiaire) varie selon la couverture nuageuse, qui elle-même dépend de la localisation géographique ou encore des saisons.

Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	32	35	35	37	39	40	50	47	36	27	24	37
42	38	36	39	37	37	38	35	35	40	48	47	39
27	30	29	26	26	24	22	15	18	24	25	29	24

Fréquences des différents types de ciel à Paris pour tous les mois de l'année. Source : satel-light.com

On observe qu'à Paris, le ciel couvert (sans soleil) apparaît environ 30 % du temps en hiver et 20 % l'été. À l'opposé un ciel clair sans nuage apparaît 30 % du temps en hiver et plus de 40 % l'été.

Du point de vue de l'intérieur d'un bâtiment, un ciel clair et ensoleillé n'apportera pas nécessairement plus de lumière qu'un ciel couvert. En effet, si le soleil direct ne pénètre pas dans le local, comme pour une baie orientée au nord en hiver, un ciel bleu apportera potentiellement moins de lumière qu'un ciel couvert avec une couche uniforme de nuages très blancs.

Les ciels modélisés

La CIE (Commission International de l'Éclairage) propose aujourd'hui 15 modélisations de types de ciels [Perez, 1993]. Elles reprennent toujours le ciel couvert uniforme, le ciel couvert CIE et le ciel clair.

Trois modèles de ciel sont couramment utilisés, ces modèles de ciels (2 ciels couverts et un ciel clair) sont les plus anciens ciels normalisés par la CIE.

Le ciel couvert uniforme : Chaque point de la voûte céleste est caractérisé par la même lu-

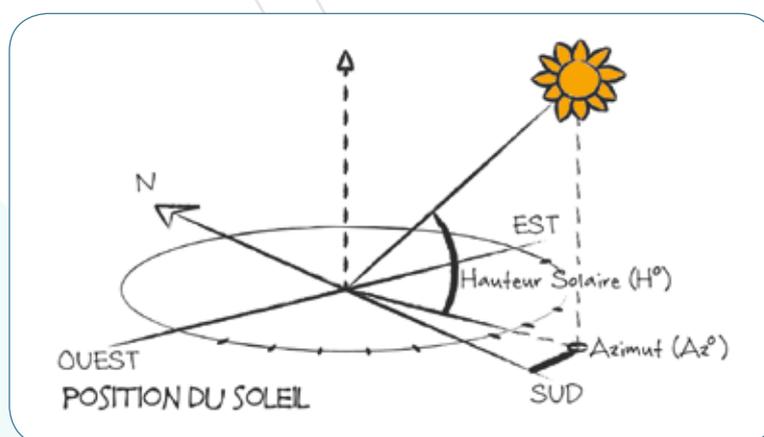
minance. Dans la pratique, cela correspond par exemple, à des conditions de brouillard dense. Il est caractérisé par $L(\theta) = L_z$ où L_z est la luminance au zénith et $L(\theta)$ est la luminance du ciel en un point présentant un angle θ avec la direction zénithale.

Le ciel couvert CIE (ou Moon & Spencer) : ce modèle stipule que la luminance du zénith est trois fois supérieure à celle de l'horizon. Il est caractérisé par $L(\theta) = L_z (1+2\sin\theta)/3$. Cette modélisation est largement utilisée. C'est notamment la modélisation qui est utilisée pour les calculs de Facteur de Lumière du Jour (FLJ).

Le ciel clair : le ciel clair peut être modélisé par le modèle de ciel tout temps de Pérez dont la formule complexe est fonction de multiples paramètres [Pérez, 93].

La position du soleil

La position du soleil est caractérisée par les angles et paramètres suivants : la latitude, la hauteur solaire, l'angle d'inclinaison de la terre et l'azimut.



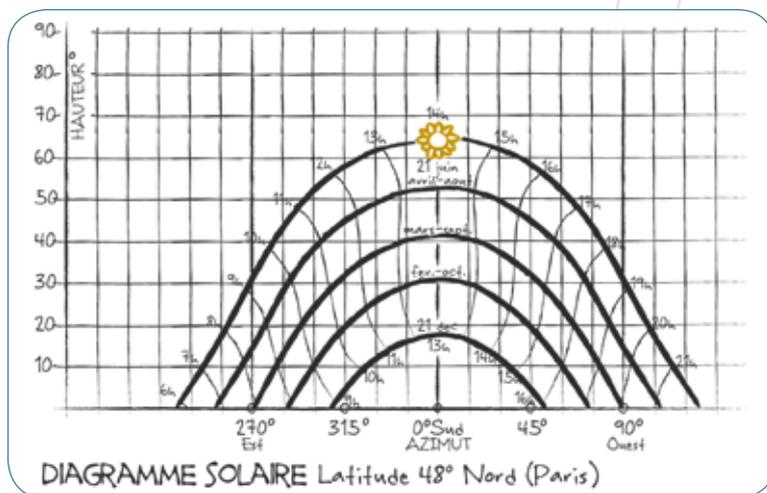
Pour une latitude LAT, la hauteur solaire H est définie par $\sin(H) = \sin(LAT) \cdot \sin(d) + \cos(LAT) \cdot \cos(d) \cdot \cos(AH)$.

Où AH est l'angle horaire donné par $AH (^\circ) = 15 (T_s - 12)$ avec T_s le temps solaire vrai exprimé en heure.

La déclinaison solaire, angle entre le plan de l'équateur et le soleil est donnée par $d (^\circ) = 23.45 \sin (0.986(284+N))$ où N est le nième jour de l'année.

La valeur de l'azimut Az est donnée par $\sin(Az) = \cos(d) \cdot \sin(AH) / \cos(h)$.

La position du soleil peut être schématisée par un diagramme cartésien, donné ici pour Paris :



Attention, les conventions de l'Association Française de l'Éclairage et de la Commission Internationale de l'Éclairage sont différentes, elles prennent pour référence le Nord à 0° et l'Est à 90°.

Les caractéristiques physiques de la lumière naturelle

Définitions et ordres de grandeur

Pour définir la lumière et son ressenti par l'œil, on utilise les grandeurs suivantes :

Le **flux lumineux** est la puissance lumineuse émise par une source dans toutes les directions. L'unité de flux lumineux est le **lumen**, symbole lm.

Un flux d'1 lumen correspond à un flux lumineux d'un faisceau d'une radiation monochromatique de longueur d'onde 555nm pour un flux énergétique de 1/683 Watt.

Par ailleurs, l'efficacité lumineuse est une notion qui traduit le flux lumineux produit par une source par unité de puissance. Ainsi, une lampe à incandescence classique a une efficacité lumineuse de l'ordre de 12 lm/W, un tube fluorescent autour de 80-90 lm/W.

L'**éclairage lumineux** correspond à un flux lumineux reçu par unité de surface. L'unité d'éclairage lumineux est le **lux**, symbole lx.

Un éclairage lumineux de 1 lux, correspond à un flux lumineux de 1 lumen couvrant uniformément une surface de 1 mètre carré (m²).

En ciel clair à midi en été, l'éclairage horizontal peut atteindre 100 000 lux.

L'intensité lumineuse est le flux lumineux émis par une source lumineuse ponctuelle dans une direction donnée. L'unité de l'intensité lumineuse est la **candela**, symbole cd.

Une intensité de 1 candela correspond à un flux lumineux d'1 lumen dans un angle solide d'1 stéradian, 1 candela correspond à l'intensité lumineuse produite par une bougie.

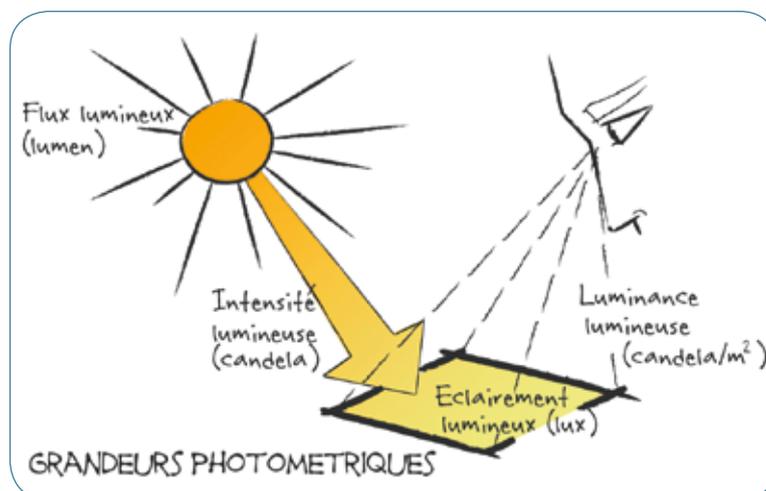
La luminance lumineuse est l'intensité lumineuse d'une source dans une direction donnée, divisée par l'aire apparente de cette source dans cette même direction. L'unité est la **candela par mètre carré**.

La luminance lumineuse est la seule grandeur photométrique appréciable par le système visuel.

Pour se repérer l'on peut indiquer que la luminance du soleil peut dépasser 10^9 cd/m² et qu'une source peut commencer à devenir éblouissante en éclairage naturel à partir de 2000 cd/m².

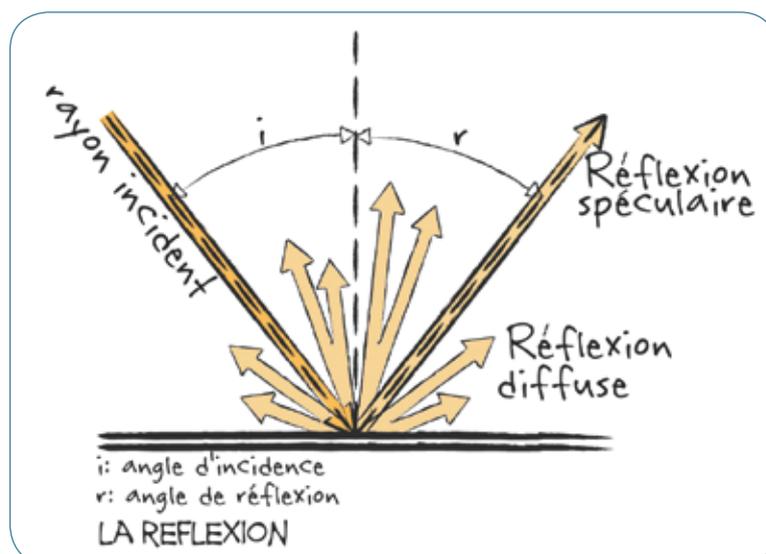
La température de couleur caractérise la couleur apparente de la lumière émise par une source. Elle est exprimée en KELVIN. Cette notion renseigne sur l'ambiance d'un espace éclairé et permet de classer une source lumineuse en :

- « teinte chaude » TK < 3300° K (lumière blanche, orangée, soleil à l'horizon),
- « intermédiaire » TK entre 3300° et 5000° K (lumière blanche, neutre),
- « teinte froide » TK > 5000° K (lumière très blanche, bleutée, soleil au zénith).



Le coefficient de réflexion lumineuse

Le facteur de réflexion lumineuse d'une surface (ρ ou Rho) est la quantité d'énergie lumineuse qu'elle réfléchit par rapport à celle qu'elle reçoit. Ce facteur de réflexion, aussi appelé coefficient de réflexion hémisphérique, se décompose en facteur de réflexion spéculaire et facteur de réflexion diffuse.



Quelques exemples :

- Réflexion spéculaire : un miroir,
- Réflexion diffuse parfaite : matériau théorique dit lambertien,
- Réflexion diffuse quelconque : la majorité des peintures mates,
- Réflexion mixte : peintures laquées.

Le tableau suivant donne des exemples de valeurs de coefficient de réflexion lumineuse (ρ) :

Peintures	
blanc	0,70 à 0,80
jaune	0,50 à 0,70
vert	0,30 à 0,60
gris	0,35 à 0,60
brun	0,25 à 0,50
bleu	0,20 à 0,50
rouge	0,20 à 0,35
noir	0,04
Bois	
bouleau clair, érable	0,55 à 0,65
chêne vernis clair	0,40 à 0,50
chêne vernis foncé	0,15 à 0,40
acajou, noyer	0,15 à 0,40
Papiers peints	
très clairs (blanc, crème)	0,65 à 0,75
clairs (gris, jaune, bleu)	0,45 à 0,60
foncés (noir, bleu, gris, vert, rouge)	0,05 à 0,36
Sols	
pelouse	0,18 à 0,23
sable	0,09 à 0,55
terre	0,26
neige fraîche	0,8 à 0,9

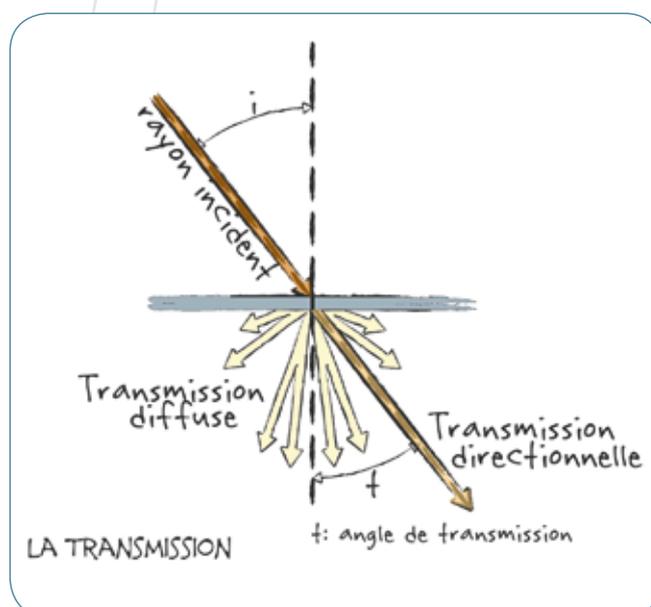
Autres matériaux de construction	
plâtre blanc	0,7 à 0,80
marbre blanc propre	0,80 à 0,85
brique blanche propre	0,62
brique rouge	0,10 à 0,20
brique rouge usagée	0,05 à 0,15
ardoise	0,1 à 0,15
asphalte	0,08 à 0,12
aluminium poli	0,65 à 0,75
aluminium mat	0,55 à 0,60
zinc	0,08 à 0,20
nickel	0,48 à 0,63
cuiivre	0,48 à 0,50
chrome	0,52 à 0,70
émail blanc	0,65 à 0,75
vitrages	0,08 à 0,40
crépis blanc neuf	0,70 à 0,80
crépis blanc usagé	0,30 à 0,60
béton neuf	0,40 à 0,50
béton ancien	0,05 à 0,15
plastique blanc	0,6
carrelage gris clair	0,3
linoléum gris foncé	0,2
moquette	0,03 à 0,25

Le coefficient de transmission lumineuse

Le coefficient de transmission lumineuse (τ ou TL) est le rapport du flux lumineux transmis au flux incident. Il définit la part de lumière visible que traverse un matériau. Cette transmission se décompose en une transmission directionnelle ou spéculaire et une transmission diffuse.

Exemples :

- Transmission directionnelle : vitrage clair
- Transmission diffuse parfaite : matériau théorique
- Transmission diffuse quelconque : vitrage sablé
- Transmission mixte : papier calque, store toile micro perforé



Matériau	Transmission lumineuse (%)
Simple vitrage clair	≈ 90
Double vitrage clair	≈ 81
Double vitrage clair basse émissivité	≈ 78
Triple vitrage clair	≈ 74
Polycarbonate opalin	≈ 50

Exemples de transmissions lumineuses optimisées de divers types de vitrage disponibles sur le marché à la date de l'écriture de cet ouvrage



Ambiances lumineuses

Définition de l'ambiance lumineuse

Parler de l'ambiance d'un lieu nous amène à imaginer un individu plongé dans un environnement et la façon dont il est, en retour, affecté par cet environnement à la fois sonore, olfactif, lumineux, esthétique, etc. L'environnement influence le sujet qui s'y trouve et crée chez lui une réaction.

Nous définissons l'ambiance lumineuse comme la manière dont l'ensemble des aspects de l'environnement lumineux affecte un sujet.

Trois dimensions constituent cette ambiance : lumière, objet architectural et sujet.

Lumière et objet architectural forment l'environnement lumineux qui est un stimulus extérieur pour le sujet. Les deux principaux paramètres de l'environnement lumineux sont la quantité de lumière et la qualité de la lumière. Leur appréciation subjective par les sujets se construit au travers des 3 phases de la vision : enregistrement, traitement et réaction au stimulus.

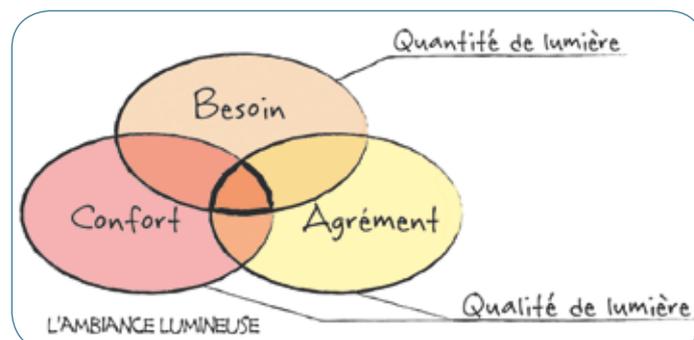
Par ailleurs, la lumière naturelle a une influence sur la santé humaine.

Les paramètres de l'ambiance lumineuse

La quantité et la qualité de lumière naturelle disponibles dans un espace intérieur dépendent des éléments architecturaux tels que les caractéristiques optiques des prises de jour, la géométrie du local, les revêtements intérieurs et l'environnement extérieur ainsi que les conditions climatiques.

La quantité de lumière nécessaire pour effectuer une activité dans de bonnes conditions lumineuses est un aspect assez bien défini aujourd'hui. La qualité de l'ambiance lumineuse se caractérise par des notions de confort et d'agrément, paramètres moins bien définis qui demandent une attention particulière.

Une ambiance lumineuse est donc fonction de ces trois paramètres [Moniteur, 2007], son caractère dépendra de l'attention qui est portée à chacun d'eux. Si un des paramètres est défavorisé par rapport aux autres, l'ambiance lumineuse ne sera pas ou peu satisfaisante et le recours à l'éclairage électrique sera nécessaire, ce qui entraînera une architecture moins durable.



Représentation schématique de l'ambiance lumineuse

Définition de l'ambiance lumineuse dans la norme EN 12464-1 : 2011 « Éclairage des lieux de travail intérieurs »

Extrait de la norme EN 12464-1 :

Pour la réalisation d'un bon éclairage, il est essentiel, qu'en plus de l'éclairage requis, les besoins qualitatifs et quantitatifs soient satisfaits.

Les exigences relatives à l'éclairage sont déterminées par la satisfaction de trois besoins humains fondamentaux :

- *le confort visuel : la sensation de bien-être ressentie par le personnel contribue d'une certaine façon à un meilleur niveau de productivité et à une meilleure qualité de travail ;*
- *la performance visuelle : le personnel est en mesure d'exécuter des tâches visuelles de qualité, même dans des circonstances difficiles et pendant de plus longues périodes ;*
- *la sécurité.*

Les paramètres les plus importants qui déterminent une ambiance lumineuse en ce qui concerne, la lumière artificielle et la lumière naturelle sont :

- *la distribution des luminances,*
- *l'éclairage,*
- *la direction de la lumière et l'éclairage de l'espace intérieur,*
- *la variabilité de la lumière (niveaux et couleur de la lumière),*
- *le rendu des couleurs et la couleur apparente de la lumière,*
- *l'éblouissement,*
- *le papillotement.*

En plus de l'éclairage, d'autres paramètres d'ergonomie visuelle influencent la performance visuelle des opérateurs, comme :

- *les propriétés intrinsèques de la tâche (la taille, la forme, la position, la couleur et la réflexion des détails et du fond),*

- *la capacité ophtalmique de l'opérateur (acuité visuelle, perception de la profondeur, perception de la couleur),*
- *une ambiance lumineuse conçue et améliorée de manière intentionnelle, un éclairage non éblouissant, un bon rendu des couleurs, des marques de contraste élevées, des systèmes de guidage optiques et tactiles peuvent améliorer la visibilité de même que la perception de la direction et la localisation. (Voir lignes directrices de la CIE qui donne les conditions de visibilité et les prescriptions d'éclairage pour l'accessibilité des personnes âgées et des personnes avec un handicap.)*

Une attention particulière à ces facteurs peut améliorer la performance visuelle sans qu'il y ait besoin d'augmenter l'éclairage.

Quantité de lumière - BESOIN

Nous parlons ici de quantité de lumière minimale pour effectuer une tâche visuelle comme par exemple lire, fixer une vis ou peindre, dans des conditions de performance visuelle¹ optimale. Les seuils sont différents en fonction de l'usage du local concerné et les surfaces sur lesquelles ces niveaux sont préconisés sont aussi fonction de l'activité. On introduit ici la notion de « plan de travail » ou « plan utile ».

Par exemple, pour un travail de lecture/écriture, le plan de travail est la table ou le bureau. Mais pour les travaux mécaniques, par exemple, le plan de travail sera défini comme le plan où le travail manuel est effectué.

Classiquement la hauteur d'un plan utile horizontal est comprise entre 70 cm, hauteur d'un bureau, et 85 cm, hauteur d'un plan de travail dans un logement. Dans certains cas tels que les circulations, salles de sport ou crèches, le plan de travail utile est considéré au niveau du sol.

1 - Le terme « performance visuelle » est utilisé pour quantifier les aptitudes d'un individu à détecter, identifier et analyser les détails de son champ de vision en se basant sur la vitesse, la qualité et la précision de sa perception. La performance visuelle dépend à la fois des caractéristiques propres à la tâche à accomplir et de la perception, elle-même influencée par les conditions d'éclairage. Elle est également affectée par d'autres paramètres tels que la capacité du système visuel de l'observateur, les perturbations distrayant l'attention, la nature de l'arrière-plan et, de manière plus générale, la façon dont est conçu l'espace de travail.

Par ailleurs, la quantité de lumière nécessaire pour effectuer une tâche visuelle dépend également du sujet lui-même à savoir son âge, la capacité de son système visuel, ses références culturelles et sa provenance géographique.

En dépit de ces variabilités, des valeurs de niveaux d'éclairement sont définies dans les normes et recommandations internationales. La part de lumière naturelle dans ces niveaux d'éclairement n'est généralement pas précisée. Certains référentiels de certification environnementale préconisent toutefois des exigences de facteur de lumière du jour à atteindre.

Qualité de lumière CONFORT et AGREMENT

Confort et absence d'inconfort

Définitions

Dans ce contexte, une ambiance lumineuse confortable est la conséquence de l'absence d'éblouissement et d'inconfort. D'après le vocabulaire international de l'éclairage [CIE, 2011], l'éblouissement est caractérisé par des conditions de vision sous lesquelles un sujet éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer les détails ou les objets, par suite d'une répartition défavorable des luminances ou d'un contraste excessif. On distingue deux formes d'éblouissement : inconfort et incapacité.

L'éblouissement d'inconfort

L'éblouissement d'inconfort produit une sensation inconfortable sans nécessairement troubler la vision des objets, à l'inverse l'éblouissement d'incapacité trouble la vision des objets sans nécessairement provoquer une sensation inconfortable. L'éblouissement d'inconfort est une sensation et donc comme toute sensation, c'est un phénomène subjectif. Il existe plusieurs méthodes et indicateurs pour caractériser l'éblouissement inconfortable, ces méthodes sont plus ou moins validées.

L'éblouissement d'incapacité

Lorsque l'on parle d'éblouissement d'incapacité, autrement dit d'une baisse de la performance visuelle, il s'agit d'un phénomène physiologique qui est davantage quantifiable.

Les deux phénomènes (éblouissements d'inconfort et d'incapacité) peuvent se produire simultanément, comme le cas d'un reflet sur un écran de visualisation, la lumière réfléchie peut causer une gêne à l'utilisateur tout en l'empêchant de distinguer correctement les caractères.

Un éblouissement incapacitant peut également survenir dans le cas de la saturation de la rétine, autrement dit lorsque les conditions visuelles varient drastiquement et brusquement. Le système visuel a besoin d'un temps d'adaptation de quelques secondes pour gérer ce changement des conditions lumineuses. Dans la pratique, à la sortie d'un tunnel, ces quelques secondes d'adaptation peuvent être critiques pour le conducteur.

La majorité des individus ne sait pas nécessairement identifier lorsque ceux-ci subissent une situation d'inconfort visuel de ce type, sauf dans le cas de la saturation de la rétine. En revanche, ils en subissent les conséquences : maux de têtes, picotements des yeux, stress... Ces effets ne sont pas forcément accompagnés d'une diminution de la visibilité et ne se manifestent pas immédiatement. Sans conséquence instantanée sur la performance visuelle, ils peuvent à terme la dégrader.

Quantification et appréciation de l'éblouissement en éclairage naturel

Les indices d'éblouissement

Il existe peu d'indicateurs d'appréciation de l'éblouissement ou de caractérisation de l'inconfort en éclairage naturel. On en retiendra quelques-uns, ils sont généralement caractérisés sous forme d'indices.

Pour l'éblouissement d'inconfort, le DGI (Daylight Glare Index) [Chauvel, 1983] est une adaptation pour l'éclairage naturel de l'UGR (Unified Glare Rating) qui est un indice couramment usité pour évaluer l'inconfort en éclairage artificiel. Ces indices prennent en compte :

- la luminance moyenne du champ de vision aussi appelée luminance d'adaptation car elle caractérise les conditions lumineuses auxquelles notre système visuel est adapté à cet instant,
- la luminance des sources éblouissantes (luminaire ou fenêtre),
- la taille et position des sources éblouissantes grâce à l'indice de position de Guth et d'un angle solide,
- la luminance du ciel vu à travers la fenêtre dans le cas du DGI.

Le DGI a souvent été jugé comme peu représentatif de l'éblouissement réellement perçu car il le surestime dans la plupart des cas.

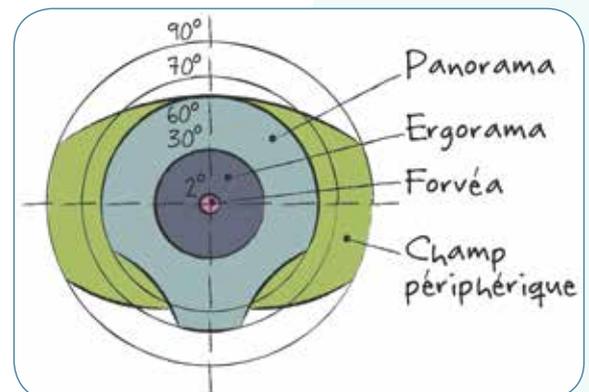
Le DGP (Daylight Glare Probability) [Wienold, 2009] a évolué en un indicateur d'estimation du potentiel d'éblouissement d'un local. Il existe trois méthodologies, le DGPs ou « DGP simplifié » basé uniquement sur l'éclairement au niveau de l'œil duquel peut être déduite la luminance d'adaptation, le DGP basé sur la position des sources éblouissantes, il est exprimé à l'aide d'une formule, ainsi qu'une méthodologie basée sur des simulations complexes utilisant notamment les techniques de lancer de rayons. Ces indices d'éblouissement sont à ce jour les plus prometteurs et font l'objet de recherches et validations en cours.

Les rapports de luminance dans le champ de vision

Dans les diverses recommandations d'éclairage, on trouve souvent la fameuse règle du « 1:3:10 ». Le principe consiste à dire que les luminances du champ de vision d'un individu effectuant une tâche de travail statique, doivent rester dans des rapports raisonnables afin de prévenir les situations d'éblouissement dues au trop fort contraste.

Ainsi, il est recommandé [Rea, 1993] [CIBSE, 1994] [CIBSE, 1996] que les rapports de luminances n'excèdent pas les valeurs suivantes :

- entre le papier et l'écran de visualisation : 3:1 ou 1:3,
- entre la tâche visuelle (écran ou papier) et les surfaces adjacentes (environnement proche ou ergorama) : 3:1 ou 1:3,
- entre la tâche visuelle et les surfaces non-adjacentes (environnement périphérique ou panorama) : 10:1 ou 1:10,
- entre les sources lumineuses (luminaires ou surfaces vitrées) et leur environnement proche : 20:1 ou 1:20.



Champ visuel

Il a été observé dans le cadre d'une campagne de mesures dans des bureaux, que si ces rapports de luminance peuvent être respectés dans le cas de scènes éclairées électriquement, elles ne sont pas nécessairement respectées en éclairage naturel, en particulier lorsqu'une fenêtre est présente dans le champ de vision de l'individu. En effet, dans ce type de configuration, même si une tolérance peut aller jusqu'à 1:50 sur une petite surface du champ de vision (5 % environ), les rapports de luminance tolérés par les occupants de bureaux sont plutôt de l'ordre de 1:6:20. [Sutter, 2006].

Il faut cependant être prudent avec ces recommandations car le non-respect de ces ratios n'entraîne pas nécessairement l'éblouissement. L'esthétique de l'espace et la qualité de la vue vers l'extérieur peuvent entraîner une tolérance à des niveaux de contrastes plus élevés.

Le cas du travail sur écran

Pour caractériser l'éblouissement d'incapacité dans le cas d'une tâche visuelle de lecture, l'approche de Blackwell est pertinente. L'Association Française de l'Éclairage (AFE), dans son guide « Éclairage et travail sur écrans de visualisation » [AFE, 1997], détaille cette méthode dans le cas du travail sur écran. La méthode consiste à dire que la luminance de voile (luminance parasite due à l'éclairage ambiant qui vient s'ajouter à la luminance initiale de la source) maximale acceptable sur un écran qui n'entraînera pas de dépréciation de la performance visuelle est fonction de la luminance de fond de l'écran. Ce qui revient à dire que, plus un écran a une luminance de fond élevée, moins l'éclairage ambiant viendra perturber la lisibilité des caractères. Par conséquent les besoins d'occultation de la lumière naturelle seront diminués, permettant ainsi à l'utilisateur de profiter davantage de l'éclairage naturel sans en subir de perturbation sur son écran.

Agrément

Rappelons quelques définitions (issues du Petit Robert) avant d'entrer dans la problématique complexe de la notion d'agrément.

Confort	« Tout ce qui contribue au bien-être, à la commodité de la vie matérielle ».
Bien-être	« Sensation procurée par la satisfaction des besoins physiques, <i>absence de tensions psychologiques</i> ».
Commode	« qui se prête aisément (<i>sans difficulté, sans peine</i>) et d'une façon appropriée à l'usage que l'on fait ».
Agrément	« qualité d'une chose, d'un être, qui les rend agréable ».
Agréable	« qui agréé, fait plaisir ».
Désagréable	« qui cause une sensation déplaisante, gênante ».

D'après ces définitions, le terme confortable implique l'absence de gêne, qui pourrait pro-

voquer une difficulté, une peine et une tension psychologique, quel que soit le degré de cette tension. Ce qui est confortable n'est donc pas désagréable (car désagréable implique gêne). Mais, nous pouvons aussi remarquer que ce qui est confortable n'est pas nécessairement agréable ! Il existe des lieux dans lesquels il n'y a pas de gêne visuelle, le lieu est confortable (pas de saturations, pas de grands contrastes de luminance ni de couleur, pas de bruit, etc.). Mais dans l'ensemble, l'ambiance peut être monotone, ennuyeuse voire triste, elle n'est donc pas agréable.

Le terme agréable et la notion d'agrément impliquent une autre idée, celle de plaisir. Sans chercher à définir la notion de plaisir, une approche possible pour la notion d'agrément [Mudri, 2001] dit que : Les concepts d'agréable et de plaisant impliquent la présence d'un stimulus extérieur qui provoque une attention, une tension psycho-physiologique (dont le degré est à définir), ce qui s'oppose à la notion d'un confort lié à l'absence de tension. Pour l'ambiance lumineuse, le stimulus extérieur se traduit par des niveaux et répartitions des luminances, des contrastes et des dégradés de luminances. Ces niveaux et répartitions sont variables d'un instant à l'autre en lumière du jour. La question de la couleur joue également un rôle dans la perception du confort et de l'agrément.

La question de la nature et du degré d'une tension est importante pour qualifier une ambiance en termes de confort et d'agrément. L'absence de tension psycho-physiologique inscrit une ambiance dans le registre du confortable, mais sa présence peut parfois contribuer à l'agrément. La question des limites est subtile et dépend, dans un milieu socioculturel donné, de la sensibilité de l'individu et de la fonction de l'espace. Qualifier une ambiance de confortable signifie qu'il n'y a pas de tension due aux stimuli extérieurs. Cependant, cette ambiance risque d'être ennuyeuse, monotone ou neutre,

sans caractère ni intérêt ou qualité. Le terme confortable, malgré sa précision, n'est pas suffisant pour décrire complètement une ambiance lumineuse. La limite du degré de cette tension qui fera basculer une ambiance d'agréable à désagréable est subtile et dépend, dans un milieu socioculturel donné, de la sensibilité de l'individu et de la fonction de l'espace. [Mudri, 2000].

Le sujet et les trois phases de la vision (ou le processus d'appréciation des ambiances lumineuses)

Première phase - Ce qui est enregistré

L'énergie lumineuse reçue par chaque élément de la rétine provoque une réaction photochimique qui se transforme en impulsions nerveuses. Ces impulsions sont transmises par les fibres des nerfs optiques aux différentes régions spécialisées du cortex : l'aire visuelle où sont enregistrés les stimuli, l'aire associative où sont comparées les sensations et l'aire psychique où se réalise l'évocation abstraite (naissance des idées).

L'œil peut être considéré comme le prolongement du cerveau car la région du cortex affectée à la vision possède autant d'éléments indépendants qu'il en existe sur la rétine.

L'énergie lumineuse reçue est constituée d'un ensemble de radiations définies par le terme général de rayonnement visible. Ces radiations, lorsqu'elles atteignent les deux types de photorécepteurs situés sur la rétine appelés « cônes » et « bâtonnets », déclenchent simultanément deux sensations : la sensation de l'intensité lumineuse via les bâtonnets et la sensation de la couleur via les cônes, elle-même décomposée en sensations de teinte et de saturation. Une image cérébrale est donc composée à partir de ces trois types d'informations, comme une photo du champ de vision. La réaction humaine dans cette première phase de vision est une sensation d'intensité lumineuse ou de couleur. C'est la première étape de la vision.

Seconde phase : Compréhension de ce qui est enregistré

L'image d'une ambiance lumineuse peut provoquer des réponses différentes suivant les sujets. C'est un processus complexe. Il existe différentes hypothèses de modèles pour les processus cognitifs qui conduisent à la compréhension de l'image enregistrée sur l'aire visuelle du cortex.

Le processus dans cette deuxième phase de vision est un traitement mental de l'image enregistrée dans la première phase de la vision. Le cerveau va traiter cette image et traduire la scène de manière factuelle avec des mots qui la décrivent.

Troisième phase : l'émotion en réaction au stimulus visuel

Après la première phase de réception du stimulus et la phase de compréhension, la troisième phase est celle des réactions émotionnelles et subjectives.

Ces réactions dépendent de nombreux paramètres socioculturels qui sont propres à chacun. Une personne pourra ressentir un espace comme élégant alors qu'une autre le trouvera prétentieux ou fade. L'émotion générée par une scène visuelle ne vient pas de la compréhension mentale à savoir la seconde phase de la vision, mais d'une appréciation émotionnelle qui vient ensuite. C'est cette phase qui explique nos émotions face à la « magie du lieu », par exemple, dans le panthéon de Rome (cf. section « Antiquité et Moyen-Âge » du chapitre « Architecture et lumière naturelle »).

Lumière naturelle, santé et bien-être

Dans notre contexte de promotion de l'éclairage naturel dans le bâtiment, ce phénomène complexe de réaction subjective de ce que nous voyons, peut se traduire par une tolérance plus grande à des luminances élevées

ou des rapports de contrastes forts en lumière naturelle par rapport à la lumière artificielle. En effet, une fenêtre est associée, plus ou moins consciemment chez chacun de nous, à une vue vers l'extérieur, à la pénétration des rayons du soleil ou encore à une dynamique de la lumière. Autant de phénomènes que n'offre pas la lumière artificielle.

À la suite de ce processus d'appréciation des ambiances lumineuses, on pourrait ajouter une quatrième phase qui est l'impact du stimulus lumineux et du rayonnement énergétique non visuel qui lui est associé sur la santé et le bien-être du sujet. De nombreux phénomènes ont été observés et validés par des recherches poussées.

Le SAD (Seasonal Affective Disorder ou syndrome dépressif saisonnier) se manifeste par une baisse de moral et des syndromes dépressifs légers à l'entrée de l'hiver lorsque la disponibilité en lumière naturelle diminue causant un dérèglement de la production de la mélatonine, autrement appelée l'hormone du sommeil, donc des cycles circadiens. Ce syndrome affecte principalement les habitants des pays à latitudes élevées où la durée du jour pendant l'hiver peut être très faible.

La découverte récente de la mélanopsine, protéine photosensible située sur la rétine, a permis de mieux comprendre les cycles circadiens et le SAD. Les cellules photosensibles contenant la mélanopsine reçoivent une stimulation maximale par les courtes longueurs d'ondes du rayonnement lumineux, c'est-à-dire les lumières à dominante de bleu. Elles produisent un signal nerveux qui n'est pas traduit par une réponse visuelle mais par une stimulation de l'hypothalamus, une des parties du cerveau responsable de la gestion des rythmes circadiens, gérant ainsi la production de la mélatonine.

La mélatonine est sécrétée par la glande pinéale et stockée dans l'hypothalamus lorsqu'il y a un signal, c'est-à-dire un rayonnement lumineux dans les courtes longueurs d'ondes. La mélatonine est libérée par le cerveau lorsqu'il n'y a plus de stimulation, autrement dit dans l'obscurité, ce qui entraîne le sommeil.

Il a été montré également, que la lumière naturelle amplifie la production de dopamine, qui est un neurotransmetteur et élément essentiel à la bonne humeur. La dopamine est principalement synthétisée et libérée par des populations de neurones très restreintes situées dans le cortex. La dopamine joue un rôle complexe et intervient dans diverses fonctions importantes, telles que le comportement, la cognition, les fonctions motrices, la motivation, le sommeil ou la mémoire.

Enfin, il a été démontré que la vitamine D, synthétisée par la peau suite à la réception des rayons solaires sur la peau, est une vitamine qui diminue les risques de cancer chez l'homme.

Dans le contexte du lieu de travail, un bon éclairage naturel a souvent été observé comme facteur influent sur l'augmentation de la productivité et la baisse de l'absentéisme. Dans un commerce, un éclairage naturel bien dimensionné peut entraîner une augmentation des ventes et de la fréquentation.

Le rapport *A Business Case for Green Buildings in Canada* [Luciuk, 2005] synthétise diverses études démontrant l'impact positif de la lumière naturelle sur la productivité et le bien-être. Il y est rapporté que, selon ces études, un bon éclairage naturel (niveaux d'éclairement satisfaisant et/ou vue plaisante sur l'extérieur) peut permettre d'améliorer la productivité et la performance de 10 à 25 % ainsi que d'augmenter les ventes de 40 % dans les commerces. Il a été également observé que l'éblouissement dû aux fenêtres peut diminuer la performance entre 15 et 21 %

Dans les écoles présentant des salles de classe à éclairage naturel soigné, il a été observé que les résultats aux tests étaient meilleurs de 5 %, le taux de présence des étudiants y était supérieur d'environ 3,5 jours par an et que, sur une période de 2 ans, les problèmes dentaires des élèves étaient diminués et leur croissance améliorée grâce à l'apport de vitamine D.



La prédétermination de l'éclairage naturel

Il existe plusieurs outils et méthodes pour prédire les conditions d'éclairage naturel dans un local.

Les mesures

Les maquettes et modèles réduits

Contrairement à la thermique, l'acoustique ou la structure ; les maquettes sont représentatives de la réalité et ne nécessitent pas de correction d'échelle pour l'éclairage naturel. En revanche, l'approche de la rugosité et de la réflexion des matériaux peut nécessiter des corrections si les matériaux réels ne sont pas utilisés. Les photos des matériaux réels, à l'échelle de la maquette, collées sur les parois de la maquette remplacent bien « les matériaux réels ». Ceci est possible pour l'étude d'éclairage car seulement la finition des parois compte. Les maquettes blanches ne sont pas représentatives.

Plusieurs sources lumineuses peuvent être utilisées pour l'éclairage des maquettes. Des mesures sous ciel réel sont possibles si la maquette est mobile. L'utilisation d'un ciel artificiel est souvent préférée car les conditions peuvent être maîtrisées alors que l'éclairement comme la composition spectrale du flux lumineux naturel change d'un instant à l'autre et il est difficile de faire les mesures et observations dans ces conditions aléatoires.

Un ciel artificiel peut être de plusieurs formes et usages :

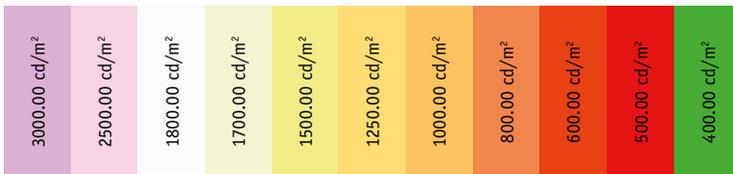
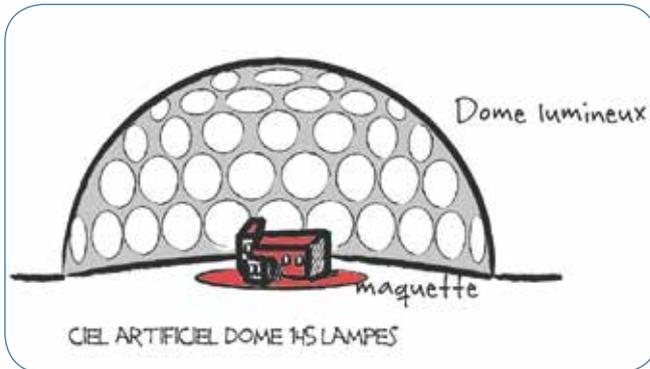
- Un local de petite taille dont les parois verticales sont des miroirs et le plafond est com-



Exemple de ciel artificiel à parois miroir
© Ljubica Mudri

posé d'un tapis de lampes sous une couche de polycarbonate dépoli. L'effet produit est celle du ciel couvert CIE (ou Moon & Spencer) car les réflexions à l'infini du plafond lumineux s'estompent à l'horizon pour s'approcher d'une luminance valant un tiers de la luminance du plafond. Ce ciel est idéal pour étudier les divers aspects architecturaux des ambiances lumineuses en ciel couvert ainsi que pour effectuer des mesures de facteur de lumière du jour dans des maquettes.

- Un dôme complet composé en théorie de 145 lampes (distribution théorique modifiée de Tregenza) pour pouvoir simuler plusieurs types de ciel. Ce ciel permet des visualisations à l'aide d'une mini-caméra (pénétration du soleil direct avec une seule source, distribution des luminances) ainsi que des mesures d'éclairement, luminance et facteur de lumière du jour.
- Une seule source mobile ou immobile qui est une discrétisation du dôme à 145 lampes, qui peut être utilisé comme héliodon ou comme ciel artificiel en combinant 145 positions.



Echelle des niveaux de luminance

Cartographie de luminances et photos prises par Ljubica Mudri au moyen d'une mini-caméra étalonnée d'un projet d'étudiant de maison de la culture

Exemples sous le ciel artificiel de type Moon & Spencer de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Belleville

Les mesures sur maquettes ont l'avantage d'être plus fiables que certains outils de simulation numérique qui ne peuvent souvent pas présenter de luminances. Elles permettent également une visualisation instantanée appréciable et représentative de la réalité.

C'est une piste qui est à recommander pour des projets de forme atypique où la modélisation sera complexe et la prédétermination de l'éclairage naturel un enjeu.

Les prototypes ou locaux témoins

Des mesures peuvent être également réalisées sur des locaux de taille réelle, comme des prototypes ou locaux témoins.

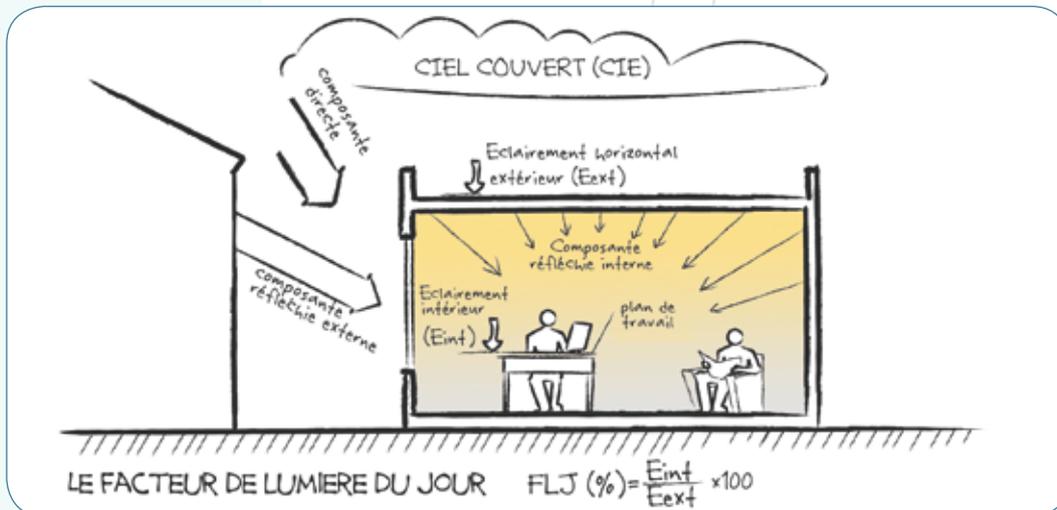
Les mesures dans des locaux témoins sont un moyen efficace de vérifier les performances de l'éclairage naturel avant qu'un projet ne soit construit.

On peut se reporter aux recommandations du guide Construire avec la Lumière Naturelle [CSTB, 2011] pour les procédures à suivre pour réaliser des mesures.

Les méthodes de calcul simplifiées

Le facteur de lumière du jour moyen

Le facteur de lumière du jour (FLJ) est l'indicateur le plus répandu d'appréciation de la qualité de l'éclairage naturel d'un local. Cet indicateur exprime le ratio entre l'éclairement intérieur en un point du plan utile et l'éclairement extérieur horizontal en site dégagé sous condition de ciel couvert dit CIE. Le FLJ traduit les conditions jugées les plus défavorable puisqu'il rend compte des performances d'un local sous des conditions de ciel couvert.



Les facteurs de lumière du jour peuvent être déterminés par simulation numérique ou bien à l'aide de formules.

Le Building Research Establishment [Littlefair, 1986] propose une formule pour estimer le facteur de lumière du jour moyen d'un local éclairé par un vitrage vertical :

$DF_{moy} = (T \cdot A_w \cdot \Theta) / A(1 - R^2)$ où :

- T est le facteur de transmission diffuse du vitrage,
- A_w est la surface vitrée en m^2 ,
- Θ est l'angle de ciel visible depuis le centre de l'ouverture,
- A est la surface totale des parois intérieures (fenêtre comprise),
- R est le coefficient de réflexion moyen pondéré en surface des parois intérieures.

Cette formule peut être utile pour estimer les facteurs de lumière du jour en phase esquisse mais ne peut aucunement être utilisé en phase conception.

Il est important de comprendre que l'inconvénient principal du facteur de lumière du jour est qu'il ne tient pas compte de l'orientation des prises de jour ni de la position géographique du site. Dans le cas des simulations

numériques, des erreurs conséquentes peuvent apparaître à cause de la modélisation du type de ciel CIE. Des différences entre mesures et simulations allant jusqu'à 100 % en dessus et au-dessous de la valeur simulée ont pu être observées [Reinhart, 2001].

L'indice de vitrage et l'indice de profondeur

L'indice de vitrage corrigé I_c est le rapport entre la surface du vitrage sur la surface du sol corrigé par le facteur de transmission du vitrage.

L'indice de profondeur I_p est le ratio entre la profondeur du local et la hauteur sous linteau au-dessus de la surface utile. Remarque : L'indice de profondeur est caractéristique d'un local à éclairage unilatéral. Si le local a une double orientation et si les ouvertures sont dans des parois parallèles, alors I_p est à considérer jusqu'à la moitié de la profondeur du local.

Le lien entre ces indicateurs est présenté dans le Traité de Construction Durable [Moniteur, 2007].

- si $I_p < 2$ et $I_c > 1/6$ alors le local est très clair
- si $2 < I_p < 3$ et $I_c > 1/6$ alors le local n'est pas très clair mais il est toujours dans la classe des locaux suffisamment éclairés. L'éclairage n'est pas uniforme. Le fond du local est peu clair à cause de la profondeur.
- si $I_p > 3$ quel que soit I_c , alors le fond du local est sombre
- si $1/10 < I_c < 1/6$ alors le local est peu clair mais $I_p < 2$ évitera un fond très sombre, l'éclairage sera plutôt uniforme. En revanche si $I_p > 2$ alors le local n'est pas suffisamment éclairé.

Ce même ouvrage rappelle la corrélation entre ces indices et le facteur de lumière du jour qui était utilisé dans le cadre de la RT 2000. Il a été observé qu'il existe un lien entre l'indicateur « $I_c - 5 \times I_p$ » et la valeur du FLJ minimum en fond de pièce. Par exemple, si $I_c = 1/5$, on utilisera sa valeur en pourcentage dans cette formule soit 20 et la valeur de I_p est utilisée telle quelle.

Cette hiérarchisation est appelée « échelle de clarté ».

Cette échelle permet en première approche de calculer la valeur du facteur de lumière du jour minimum dans un local.

Ces méthodes sont applicables dans des cas de locaux présentant des paramètres standards : enveloppe intérieure raisonnablement claire et masque faible à moyen.

Tout comme le facteur de lumière du jour moyen, ces indicateurs ne sont pas des méthodologies de conception mais plutôt des garde-fous qui permettent de vérifier par un calcul rapide si les premiers dimensionnements des ouvertures pourront permettre un éclairage naturel satisfaisant ou non.

Classification	Valeur de $(I_c - 5I_p)$	Description	Valeur de FLJ_{mini} (%)
I	> 5	Local très clair Éclairage naturel très abondant	> 2
II	Entre 0 et 5	Local clair Éclairage naturel abondant	Entre 1,5 et 2
III	Entre -5 et 0	Local peu clair à sombre Éclairage naturel faible	Entre 1 et 1,5
IV	$< - 5$	Local très sombre Éclairage naturel insuffisant	< 1

Les méthodes de calcul avancées et simulations numériques

Le facteur de lumière du jour ponctuel

Le facteur de lumière du jour ponctuel peut être déterminé par des méthodes analytiques en décomposant le facteur de lumière du jour en ses trois composantes (directe, réfléchie externe et réfléchie interne) qui seront calculées séparément. Ces méthodes de calcul sont longues et fastidieuses [Littlefair, 1998], on leur préférera des méthodes de simulation numérique.

L'autonomie lumineuse

Autonomie en éclairage naturel

L'autonomie lumineuse en éclairage naturel est définie comme le nombre d'heures annuelles (sur une plage horaire définie, par exemple de 8 h à 18 h) qui atteindront une consigne d'éclairement donnée en point d'un local grâce à la lumière naturelle seule. L'avantage de l'autonomie lumineuse par rapport au FLJ est qu'elle prend en compte tous les types de ciel car son calcul (par simulation uniquement) est basé sur des données météorologiques.

Le référentiel de certification BREEAM semble être le seul à ce jour à intégrer l'autonomie lumineuse comme indicateur de performance en éclairage naturel. Il y est recommandé une autonomie de 2 650 heures à 200 lux.

Le concept d'autonomie a été décliné en plusieurs versions qui sont intégrées dans le logiciel de simulation DAYSIM [Reinhart, 2006].

Lumière naturelle utile (Useful Daylight Illuminance – UDI)

L'indicateur Useful Daylight Illuminance (UDI) ne prend en compte que les périodes où l'éclairage naturel sera utile aux occupants, autrement dit lorsque les conditions dans le local ne seront ni trop sombres (< 100 lux),

ni trop lumineuses (> 2000 lux). Cet indicateur permet de considérer la lumière naturelle lorsqu'elle n'aura pas besoin d'être occultée pour des raisons d'éblouissement ou complétée par de la lumière électrique.

Autonomie Lumineuse Continue (DA_{con})

L'indicateur Autonomie Lumineuse Continue (DA_{con}) est plus souple que l'autonomie lumineuse décrite plus haut. En effet, le DA_{con} prend en compte la lumière naturelle qui est en dessous de la consigne minimum fixée. Par exemple, si la consigne est de 500 lux, lorsque 400 lux seront atteints en un point grâce à la lumière naturelle, une pondération est donnée à l'autonomie (dans ce cas 400/500). Cet indicateur permet de valoriser les systèmes de gradation de l'éclairage électrique.

Autonomie Lumineuse Maximum (DA_{max})

De la même manière, l'Autonomie Lumineuse Maximum (DA_{max}) rend compte des périodes durant lesquelles un éblouissement pourra potentiellement se produire (pour un éclairage correspondant à 10 fois la consigne d'éclairement fixée).

Autonomie spatiale en éclairage naturel (Spatial Daylight Autonomy - sDA)

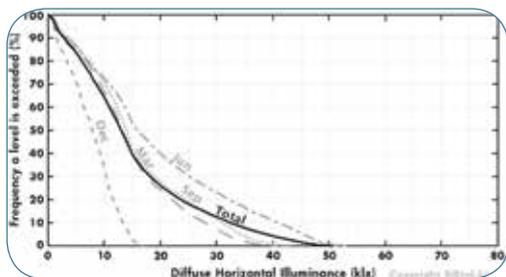
La Spatial Daylight Autonomy est le plus récent des indicateurs basés sur la notion des « climate-based metrics », sa définition est disponible dans le document IES LM-83-12 "Approved Method: IES Spatial Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)".

À l'inverse des autres indicateurs, le sDA est une valeur unique pour un local. Il traduit le pourcentage de surface au-delà de 300 lux pendant 50 % du temps.

Calcul de l'autonomie lumineuse

L'autonomie lumineuse peut être estimée en première approche à l'aide de courbes de fréquence de dépassement d'éclairage horizontal diffus extérieur.

Lorsque le facteur de lumière du jour moyen d'un local et la consigne à y respecter sont connus, il est simple d'en estimer l'autonomie en éclairage naturel diffus à l'aide d'une courbe de fréquence pour une localisation donnée.



Répartition en fréquence des niveaux d'éclairage extérieur horizontal diffus à Paris – Source : www.satel-light.com

Un exemple d'application :

Si un local à Paris a un FLJ moyen de 2 % et que la consigne est de 300 lux on peut en déduire à l'aide de la définition de base, que cette consigne sera atteinte dès lors que l'éclairage horizontal extérieur diffus atteindra 15 000 lux. Le local aura une autonomie moyenne annuelle d'environ 40 %, fluctuant entre 3 % en décembre et 60 % en juin.

À l'inverse, si l'on souhaite un local qui soit autonome en éclairage naturel durant 60 % du temps, on lit sur la courbe de répartition en fréquence que le niveau extérieur atteint durant 60 % du temps est 11 000 lux. Si l'on décide que la consigne à atteindre est 300 lux, il conviendra de dimensionner les ouvertures pour garantir un FLJ moyen de 2,7 %.

Cette méthode est très pratique en phase esquisse. Cependant, pour des résultats plus précis, l'autonomie lumineuse sera préférablement calculée à l'aide d'outils de simulations numériques qui utilisent des statistiques de données météorologiques et des algorithmes de calcul validés.

Les outils de simulations informatiques

Une fois le local modélisé à l'aide d'un outil de modélisation 3D, ses performances en éclairage naturel peuvent être estimées à l'aide de logiciels de simulations numériques.

Les divers logiciels disponibles sur le marché utilisent des méthodologies différentes. On retiendra trois algorithmes qui, à ce jour, nous semblent les plus fiables et validés.

La radiosité

Le principe de l'algorithme de radiosité (ou illumination globale) est de bombarder la scène à calculer de photons émis dans toutes les directions par la ou les sources lumineuses. Lors de leur parcours, les photons frappent les éléments de la scène. Ils sont alors absorbés, réfléchis ou réfractés suivant les caractéristiques optiques des matériaux qui constituent la surface des éléments de la scène. Ces photons réfléchis frappent alors de nouveaux éléments de la scène.

Il s'agit donc d'un processus itératif qui prend fin suivant les paramètres entrés dans la simulation (nombre de rebonds par exemple). Ces simulations sont coûteuses en temps de calcul.

L'algorithme produit des images photo réalistes de qualité. Son avantage réside dans le fait qu'il effectue un calcul global de la scène et permet donc de disposer d'images pour tous les points de vue. Il ne nécessite donc pas de nouveau calcul pour obtenir une image pour un point de vue différent de celui de départ.

Le ray-tracing

Le principe des algorithmes par lancer de rayons consiste à calculer directement les pixels de l'image souhaitée.

Pour chaque pixel, un rayon est lancé. Le premier objet frappé par le rayon définit l'objet concerné de l'image. Depuis ce premier point,

des rayons sont émis en direction des sources de lumière en fonction des caractéristiques optiques des matériaux de la surface pour déterminer si le point est illuminé et avec quelle quantité d'énergie.

Cette méthode est généralement plus performante que l'algorithme de radiosité et permet de dépasser les limitations de la radiosité. En revanche, cette technique ne permet que de générer une image à la fois et tout changement de point de vue nécessite un nouveau calcul.

Le photon-mapping (ou lancer de particules)

L'objectif du photon-mapping est d'améliorer l'efficacité des algorithmes de radiosité en découplant le calcul de la propagation des photons des calculs d'illumination. Il s'agit d'une combinaison de radiosité et de lancer de rayons.

Comme en radiosité, des photons sont émis depuis les sources lumineuses. Lorsque les photons frappent les éléments de la scène, ceux-ci sont stockés dans une carte (photon map). Comme en ray-tracing, des rayons sont émis depuis le point de vue. Ces rayons sont calculés indépendamment. Une phase de rendu est ensuite effectuée pour calculer l'illumination de chaque pixel.

Conclusions sur les outils de simulations numériques

La méthode du lancer de rayon demeure le moyen d'obtenir les images les plus réalistes. Il est toutefois lourd en calculs car nécessite un recalcul pour chaque changement de point de vue. Toutefois, dans les calculs et utilisations évoqués dans ce guide, les algorithmes de photon-mapping, voire de radiosité sont suffisants.

La principale difficulté réside dans la complexité de mise en œuvre de ces algorithmes car ceux-ci s'appuient sur de nombreux paramètres complexes et peu aisés à comprendre pour l'utilisateur non-spécialiste.

Or, une mauvaise combinaison de ces paramètres peut aboutir à des résultats qui n'ont pas de validité en termes d'illumination de la scène et donc les résultats finaux peuvent être faux, voire fantaisistes. Il est aussi important de noter que la précision de la scène modélisée est un élément essentiel d'un calcul correct. Ce point n'est pas aussi facile à maîtriser qu'il n'y paraît, en particulier dans la caractérisation des matériaux.

Position de l'ICEB

L'indicateur facteur de lumière du jour présente des limites, il n'est notamment pas adapté à la conception des protections solaires et peut entraîner un surdimensionnement des baies en ciel clair. C'est cependant la méthodologie la plus utilisée internationalement pour caractériser la quantité de lumière naturelle dans un local.

Au-delà de l'indicateur lui-même, il est important d'adapter la zone de calcul à l'usage du local (exemple : la totalité d'un open space, d'une salle de jeux dans une crèche, d'une cuisine...). Les zones de calcul proposées par les certifications environnementales peuvent être parfois en incohérence avec l'activité qui y est exercée.

Les indicateurs dynamiques de type « autonomie lumineuse » sont prometteurs. Il conviendra de rester attentif aux seuils qui seront proposés par les organismes spécialisés tels que l'Association Française de l'Éclairage ou la Commission Internationale de l'Éclairage.

Par ailleurs, plutôt que de recommander des logiciels de simulations numériques du comportement de la lumière naturelle, l'ICEB préfère conseiller aux usagers de s'assurer que le logiciel qu'ils choisissent utilise bien un des algorithmes détaillés dans ce guide.

Nous proposons ci-après une synthèse sous la forme points forts / points faibles des indicateurs présentés dans cet ouvrage, selon les trois paramètres de caractérisation d'une ambiance lumineuse : la quantité de lumière, le confort et l'agrément.

Indicateur	Points forts	Points faibles
Quantité de lumière		
Ic & Ip (Indice de vitrage et indice de profondeur)	Très simple. Applicable très tôt dans la conception du projet. Donne des informations sur la quantité de lumière et sa répartition dans la profondeur.	Les seuils définis sont valables uniquement pour des obstructions petites à moyennes et des parois intérieures plutôt claires.
FLJ (Facteur de Lumière du Jour)	Largement connu. Seuils et critères définis. Donne de l'information lors des conditions climatiques peu favorables pour la lumière (ciel couvert). Permet de comparer les bâtiments entre eux.	Toutes les conditions climatiques locales du site ne sont pas prises en compte. Ne tient pas compte de l'orientation des baies. Ne permet de calculer des consommations énergétiques pour l'éclairage que pour le ciel couvert uniquement (50 % du temps par an à Paris par exemple).
Autonomie lumineuse	Toutes les conditions climatiques locales du site sont prises en compte. Permet de calculer les consommations sur toute l'année.	Pas de seuils actuellement largement acceptés. Encore en cours de développement, il existe plusieurs variantes de l'autonomie. Si le climat du site est très favorable, même une mauvaise architecture peut donner de bons résultats. A contrario, une excellente architecture dans des conditions climatiques défavorables ne donnera sans doute pas de bons résultats. Les architectures respectives des bâtiments du point de vue de la prise de lumière naturelle ne peuvent être comparées.
Qualité-Confort		
DGP (Daylight Glare Probability)	Fondé sur des études de comportement. Possède un sens compréhensible car il traduit une probabilité d'être ébloui. Conçu spécifiquement pour la lumière naturelle.	Uniquement étudié en situation de bureau. Méthode de calcul encore peu répandue. Rend compte des conditions à un instant t, un calcul dynamique pourrait être envisagé.
Qualité-Agrément		
Lumière « douce », « dynamique », etc.	Langage qualitatif proche des intentions architecturales. Expressions compréhensibles par le public.	Pas de définition actuellement opérationnelle. Pas d'indicateurs définis actuellement.

Le projet de recherche Confort, Lumière, Énergie, Ambiance (CLEA), financé sur fonds FEDER (mandataire De Luminae), étudie actuellement une grande variété d'indicateurs, pour définir des méthodes et outils logiciels d'évaluation de l'ambiance lumineuse en lumière du jour dans les espaces intérieurs et les tissus urbains. Il étudie en particulier les indicateurs de qualité des ambiances (confort et agrément) à intégrer dans un futur outil logiciel.



Recommandations, réglementations et certifications environnementales

Il n'y a pas d'obligations réglementaires quantifiées relatives à l'éclairage naturel. C'est une des raisons pour lesquelles les exigences spécifiques des démarches environnementales et référentiels de certification peuvent être perçues comme contraignantes, c'est notamment le cas des recommandations relatives aux facteurs de lumière du jour.

Code du Travail

Le document Éclairage des locaux de travail – Aide mémoire juridique [INRS, 2000] détaille toutes les exigences relatives à l'éclairage présentes dans les textes officiels.

Le Code du Travail spécifie que « l'éclairage doit être conçu et réalisé de manière à éviter la fatigue visuelle, ainsi que les affections de la vue qui en résultent [...]. Les locaux de travail doivent, autant que possible, disposer d'une lumière naturelle suffisante »

Dans les constructions neuves, « les locaux affectés au travail doivent comporter à hauteur des yeux des baies transparentes donnant sur l'extérieur, sauf en cas d'incompatibilité avec la nature des activités envisagées » comme indiqué dans l'article R 4213-3.

Dans le décret n° 92-333 du 31 mars 1992, l'article R. 232-7-4 précise que « les postes de travail situés à l'intérieur des locaux de travail doivent être protégés du rayonnement solaire gênant soit par la conception des ouvertures,

soit par des protections fixes ou mobiles appropriées ». L'article R. 232-7-5 indique que, des « dispositions appropriées doivent être prises pour protéger les travailleurs contre l'éblouissement et la fatigue visuelle, provoqués par des surfaces à forte luminance ou par des rapports de luminance trop importants entre surfaces voisines ».

L'article R. 4213-2 du code du travail recommande de privilégier l'éclairage naturel dans la mesure où l'activité exercée le permet. Cet article évoque le fait que la lumière artificielle ne devrait fournir qu'un rôle d'appoint dans la mesure où elle n'offre pas aux occupants les repères qui rythment le déroulement d'une journée.

À titre indicatif, le dernier alinéa de l'article 7 du décret n° 91-451 du 14 mai 1991 prévoit, entre autres, que "l'écran doit être exempt de reflets et de réverbérations susceptibles de gêner l'utilisateur".

Le décret n° 83-721 du 2 août 1983 complétant le Code du Travail en ce qui concerne l'éclairage électrique des lieux de travail, fixe des valeurs minimales à respecter pour l'éclairage général des cas suivants :

Type de travail	Décret
Bureau / poste de travail	200 lux
Autres locaux de travail	120 lux
Les voies de circulation intérieure	40 Lux
Les escaliers et entrepôts	60 Lux
Les locaux de travail, vestiaires et sanitaires	120 Lux
Les locaux aveugles affectés à un travail permanent	200 Lux
Les zones et voies de circulation extérieure	10 Lux
Les espaces extérieurs où sont effectués des travaux à caractère permanent	40 Lux

Ces valeurs sont des minimums à maintenir et non des valeurs à installer, il convient donc de tenir compte des variations d'uniformité et de l'affaiblissement du flux lumineux des sources (vieillesse des lampes, encrassement...).

Dans le cadre d'une opération de réaménagement ou de réhabilitation, la circulaire n° 90-11 du 28 juin 1990 précise que si des améliorations ne sont pas possibles à cause du contexte, la conception du projet ne doit pas aggraver la situation existante. Dans ces situations, des mesures compensatoires seront à spécifier.

Normes

La principale norme européenne traitant de l'éclairage est la NF EN 12464-1 : 2011 : Lumière et éclairage - éclairage des lieux de travail - Partie 1 : lieux de travail intérieur.

Cette norme spécifie les exigences d'éclairage électrique (éclairage moyen, indice

d'éblouissement UGR, uniformité et indice de rendu des couleurs) permettant aux utilisateurs de lieux de travail de diverses natures d'effectuer leurs tâches visuelles de manière optimale.

Elle recommande un niveau d'éclairage moyen de 500 lux sur le plan de travail pour les tâches de bureau classiques. Cette valeur est un sujet sensible en France. En effet, le référentiel HQE spécifie que 300 lux sont suffisants (voir ci-dessous) dans le cas du travail sur écran.

Concernant la lumière naturelle, la norme spécifie que « la lumière du jour peut fournir une partie ou la totalité de l'éclairage pour des tâches visuelles et, par conséquent, offre la possibilité de réaliser des économies d'énergie. De plus, elle varie en niveau, en direction et en composition spectrale dans le temps et provoque donc un modelé variable ainsi que des répartitions variables de luminance, ce qui est perçu comme étant bénéfique pour les personnes présentes dans des environnements de travail intérieurs.

La pose de fenêtres est fortement privilégiée sur les lieux de travail pour la lumière de jour qu'elles délivrent et pour le contact visuel qu'elles fournissent avec l'environnement extérieur. Cependant, il est également important de s'assurer que les fenêtres ne provoqueront ni inconfort visuel ou thermique, ni perte d'intimité ».

Référentiels de certification et recommandations

Les différents référentiels de certification qui sont utilisés en France et à l'étranger (HQE, BREEAM, LEED) utilisent des méthodes différentes d'appréciation de l'éclairage naturel dans un local. Certains bureaux d'étude proposent également des recommandations qui leur sont propres notamment pour les logements.

BREEAM

Les critères d'évaluation se basent sur 3 aspects pour démontrer l'atteinte des exigences et obtenir 1 point. Selon les typologies de bâtiment, une combinaison de ces critères est demandée pour valider les exigences d'éclairage naturel.

1. La conception de l'éclairage naturel dans le local respecte les exigences nationales réglementaires.
2. 80 % de la surface utile de bureau a un FLJ moyen de 1,8 % (à Paris) ou une autonomie annuelle de 2 650 heures à 200 lux.
3. Une uniformité de 0,4 (0,7 pour les locaux éclairés en zénithal) ou un FLJ ponctuel moyen de 0,72 % (à Paris) ou au moins 80 % de la surface de chaque local considéré reçoit de la lumière du ciel directement et le critère de profondeur de la pièce défini par $d/W + d/HW < 2/(1-RB)$ avec :
 - d = profondeur de la pièce,
 - w = largeur de la pièce,
 - HW = hauteur du haut de la fenêtre à partir du sol,
 - RB = facteur de réflexion lumineuse moyen des surfaces dans la seconde moitié de la pièce.

Si les performances en éclairage naturel des locaux vont au-delà de ces exigences, un point additionnel (« innovation crédit ») peut être attribué (voir le référentiel BREEAM Europe Commercial 2009 pour le détail des exigences).

LEED

Différentes options sont possibles pour vérifier l'atteinte des objectifs de confort visuel dans le cadre de la certification environnementale américaine LEED.

Il s'agit de démontrer par le biais de simulations numériques que les espaces considérés atteignent des niveaux d'éclairement de :

- au minimum 25 fc (soit 270 lux),
- au maximum 500 fc (soit 5 400 lux),

pour des conditions normalisées de ciel clair du 21 septembre à 9 h et 15 h. Ces conditions d'éclairage naturel doivent être obtenues sur au moins 75 % des surfaces à occupation régulière.

Les surfaces dont les niveaux d'éclairement sont en dehors de la plage indiquée ne sont pas conformes. Cependant, les conceptions intégrant des protections automatiques permettant à la fois de lutter contre l'éblouissement et de préserver les vues vers l'extérieur donnent la possibilité de ne démontrer que l'atteinte de l'exigence d'éclairement minimale de 25 fc (soit 270 lux).

Démarche HQE

Le référentiel de certification NF Bâtiments Tertiaires - Démarche HQE® (Version du 20/01/2012) indique que pour obtenir de bonnes conditions de confort visuel (cible 10), il convient d'assurer à la fois :

1. Un éclairage naturel optimal afin de profiter au mieux de la lumière naturelle dans les locaux dont le taux d'occupation le justifie.

Cette optimisation passe par la garantie de vues vers l'extérieur, des exigences de facteur de lumière du jour pour les zones de premier et second rang et la mise à disposition de protections solaires. La zone de premier rang est définie comme l'espace entre le nu intérieur de la façade et une profondeur de $2 \times$ (hauteur sous plafond – hauteur du plan utile). Dans cette zone, les niveaux suivants doivent être atteints :

Niveau Base	FLJ $\geq 1,2$ % sur 80 % de la surface de la zone de 1 ^{er} rang dans 80 % des locaux (en surface)
Niveau Performant	FLJ ≥ 2 % sur 80 % de la surface de la zone de 1 ^{er} rang dans 80 % des locaux (en surface) FLJ $\geq 1,5$ % sur 80 % de la surface de la zone de 1 ^{er} rang dans les 20 % restants (en surface)
Niveau Très Performant	FLJ ≥ 2 % sur 80 % de la surface de la zone de 1 ^{er} rang dans 80 % des locaux (en surface) FLJ $\geq 1,5$ % sur 80 % de la surface de la zone de 1 ^{er} rang dans les 20 % restants (en surface) ET FLJ $\geq 0,7$ % sur 90 % de la surface de la zone de 2 nd rang dans tous les locaux.

- Un éclairage artificiel satisfaisant et de qualité en l'absence ou en complément de la lumière naturelle. Cet éclairage artificiel sera conforme aux exigences de la norme EN-12464-1 (2011) pour les niveaux d'éclairage, uniformité, indice d'éblouissement UGR et indice de rendu des couleurs. Dans le cas du travail sur écran de visualisation, le référentiel autorise la dégradation du niveau d'éclairage moyen sur le plan de travail en assimilant, pour ce cas précis, les salles de bureaux à des salles de pratique informatique de bâtiments scolaires où le niveau d'éclairage moyen requis sur le

plan de travail est de 300 lux et non les 500 lux requis par la norme pour le travail de bureau avec ou sans écran de visualisation.

Habitat & Environnement

Pour les logements, il existe la certification Habitat & Environnement. Son référentiel contient des exigences, quantitatives et qualitatives, propres à l'éclairage naturel. Elles sont à choisir parmi les suivantes, au choix en fonction du niveau de performance recherché :

- Au moins 80 % des logements de l'opération ou 80 % des pièces suivantes des logements, respectent les indices d'ouverture (rapport de la surface d'ouverture - y compris menuiserie et vitrage - à la surface au sol de la pièce) définis ci-dessous :
 - séjour, y compris séjour avec cuisine ouverte : l'indice d'ouverture est supérieur ou égal à 15 % ($I_o \geq 15$ %),
 - cuisine fermée : l'indice d'ouverture est supérieur ou égal à 10 % ($I_o \geq 10$ %),
 - chambre (au moins une par logement) : l'indice d'ouverture est supérieur ou égal à 15 % ($I_o \geq 15$ %).
- Une analyse contextuelle du confort visuel est fournie à l'auditeur dans laquelle les trois points suivants au minimum sont traités :
 - analyse des contraintes et opportunités liées au site et à l'environnement (contraintes orientation, contraintes monuments historiques, vues panoramiques : monuments, jardins...),
 - relation intérieur/extérieur (perceptions visuelles de l'espace intérieur, perspectives vers l'extérieur...),
 - traitement de la lumière du jour à l'intérieur du logement.
- Dispositions réduisant les risques d'éblouissement et permettant une meilleure répartition de la lumière naturelle. Pour les maisons individuelles ou accolées et les

bâtiments collectifs d'habitation, la surface totale des baies des logements, mesurée en tableau, est supérieure ou égale à 1/6 de la surface habitable (cf. RT 2012).

4. Disposer d'un éclairage minimal à la lumière naturelle

- La salle d'eau principale dispose d'une surface vitrée et translucide.
- Pour les logements les plus défavorables, faire réaliser une étude technique, justifiant que le logement remplit les conditions suivantes : le facteur de lumière du jour sera calculé en deux points situés sur l'axe passant par le milieu de la baie :
 - En séjour :
 - 1^{er} point : $FLJ \geq 3 \%$ à une distance horizontale h depuis la baie avec h correspondant à la hauteur sous plafond,
 - 2^e point : $FLJ \geq 1,5 \%$, à une distance horizontale $2h$ depuis la baie (ou en fond de pièce si la profondeur de la pièce est inférieure à 2 fois sa hauteur).
 - En chambre :
 - 1^{er} point : $FLJ \geq 2 \%$ à une distance horizontale h depuis la baie,
 - 2^e point : $FLJ \geq 1 \%$ à une distance horizontale $2h$ depuis la baie (ou en fond de pièce).
- Les logements disposent en cuisine, d'un indice d'ouverture supérieur ou égal à 15 % ($I_o \geq 15 \%$).
- Au moins 80 % des logements de l'opération ou 80 % des pièces suivantes des logements, respectent les indices de vitrage (indice d'ouverture (I_o) corrigé par le pourcentage de cadre) définis ci-dessous :
 - séjour, y compris séjour avec cuisine ouverte : l'indice de vitrage est supérieur ou égal à 13,5 % ($I_v \geq 13,5 \%$),
 - cuisine fermée : l'indice de vitrage est supérieur ou égal à 9 % ($I_v \geq 9 \%$),
 - chambre (au moins une par logement) : l'indice de vitrage est supérieur ou égal à 13,5 % ($I_v \geq 13,5 \%$).

Extrait du référentiel *Qualitel – Habitat et Environnement, Millésime 2012*

Recommandations du bureau d'études TRIBU

Dans le cadre de projets de logements, le bureau d'études TRIBU propose les recommandations suivantes :

- l'indice d'ouverture (rapport de la surface d'ouverture (y compris menuiserie et vitrage) à la surface au sol de la pièce) est compris entre 20 et 25 %. L'indice d'ouverture global du logement peut être modulé par pièce : plus pour les séjours (à condition qu'ils soient orientés vers des directions ensoleillées en hiver) et les cuisines ensoleillées et moins sur les chambres,
- le facteur de transmission lumineuse des vitrages est supérieur à 60 %,
- sur une bande de 2 m partant de la façade, le facteur de lumière du jour ponctuel est supérieur à 2 % dans le séjour, les chambres et la cuisine,
- les salles de bain et WC en façade, ainsi que les circulations communes bénéficieront autant que possible d'un éclairage naturel (et d'un ouvrant).

Ces recommandations résultent d'un arbitrage entre confort lumineux et limitation des déperditions thermiques et des surchauffes d'été.

Point de vue de l'ICEB sur ces exigences

La diversité des indicateurs et des seuils entre les référentiels de certification environnementale montre la difficulté de trouver aujourd'hui un indicateur commun qui soit validé. Il faut également comprendre que les exigences des divers référentiels génèrent des réponses architecturales différentes. Ainsi, à titre d'exemple, si l'on applique à l'architecture de Le Corbusier présentée dans le chapitre 2 les exigences des certifications BREEAM et HQE, on s'aperçoit que c'est une architecture qui ne répond pas à l'approche de BREEAM qui encourage la conception de locaux peu profonds où l'éclairage naturel présente une bonne uniformité. La démarche de Le Corbusier aurait en revanche été davantage valorisée par l'approche de la certification HQE et sa notion de zone de premier rang.

On constate également que les référentiels évoluent de manière distincte vers la prise en compte d'autres indicateurs (comme par exemple l'autonomie lumineuse). Des recherches sont encore nécessaires pour trouver l'indicateur d'éclairage naturel universel qui pourra être adopté de manière unanime.

Il existe aujourd'hui un débat sur le niveau d'éclairage à maintenir sur le plan de travail dans le cas du travail de bureau (300 lux, 500 lux...). Il est difficile de trancher à ce jour. L'ICEB peut cependant préciser les éléments suivants :

- L'expérience nous montre que dans le cas du travail sur écran, un éclairage sur le plan de travail de 500 lux, tel qu'il est requis dans la norme EN 12464-1, semble être excessif. Une consigne de 300 lux serait plus appropriée.
- Le travail de bureau étant aujourd'hui une combinaison de saisie sur écran et d'écriture ou lecture sur papier, des conditions d'éclairage adaptables sont donc souhaitables, à l'aide d'un éclairage général pour le travail sur écran et d'un éclairage d'appoint plus puissant pour le travail de lecture et d'écriture.

- Le besoin en éclairage varie fortement selon les individus. Par conséquent, il est essentiel que les usagers puissent agir sur les conditions d'éclairage naturel et artificiel : réglage des stores, lampe d'appoint...

Par ailleurs, dans le cas du travail sur écran qui est une surface verticale, il semble peu adapté de caractériser les conditions de performances visuelles optimales à l'aide d'une consigne d'éclairage horizontal sur le plan de travail. En effet, il faut comprendre que dans ce cas, la répartition des luminances dans le champ de vision est un indicateur plus pertinent pour apprécier la qualité des conditions d'éclairage que l'éclairage horizontal sur le plan de travail (voir chapitre sur les ambiances lumineuses).



Solutions pour bien concevoir l'éclairage naturel d'un bâtiment

Pour bien concevoir l'éclairage naturel d'un bâtiment, il est essentiel de se poser les bonnes questions au bon moment. Ce chapitre a pour ambition d'aider les équipes de conception et la maîtrise d'ouvrage à aborder la problématique de l'éclairage naturel dans le cadre d'un projet de construction ou de réhabilitation d'un bâtiment dont les contraintes sont différentes.

Valoriser l'éclairage naturel dans la conception architecturale bioclimatique permet d'assurer un confort visuel satisfaisant tout en réalisant des économies d'énergie. La réussite d'un tel objectif découle d'un paramétrage précis entre :

- besoins et possibilités d'éclairage naturel d'un bâtiment ;
- dispositifs d'éclairage naturel et électrique ;
- besoin en chauffage et rafraîchissement.

Ce paramétrage a lieu lors de la conception mais peut aussi se faire en interaction avec les utilisateurs par la régulation, le contrôle de l'ensoleillement ou encore les aménagements intérieurs.

Enfin, l'éclairage naturel d'un bâtiment ne peut être performant sans un entretien et une maintenance soignés des dispositifs d'éclairage naturel et des protections solaires.

Contexte

Avant d'aborder la conception en éclairage naturel d'un bâtiment, il s'agit de comprendre quelles sont les possibilités qui lui seront offertes par les contraintes et exigences diverses. Celles-ci peuvent être d'ordre contextuel et géographique (latitude du site, masques environnants), programmatiques (exigences des démarches environnementales ou des réglementations) ou d'usage (type de bâtiment et d'utilisateurs).

Nous proposons ici une hiérarchisation des problématiques à considérer avant de concevoir l'éclairage naturel d'un bâtiment.

Typologie et utilisation

Dans un premier temps, il s'agira de comprendre l'impact de la typologie du bâtiment sur ses besoins en éclairage naturel.

En effet, les besoins en lumière naturelle varient selon l'usage d'un bâtiment : ses fonctionnalités et périodes d'occupation. Les exigences seront différentes dans un bureau, un hôpital ou encore une école. Il existe bien entendu des contraintes diverses concernant la localisation de la construction d'un projet mais si le choix est possible, on préférera, par exemple, implanter une école sur un site dégagé pour offrir aux enfants des vues stimulantes et un maximum de lumière naturelle.

Exigences environnementales

Les démarches environnementales présentent des exigences concernant les performances en éclairage naturel d'un bâtiment. Elles peuvent concerner les accès aux vues, les niveaux d'éclairement ou encore les protections solaires. Elles proviennent du savoir-faire du programmiste ou de l'AMO HQE, d'un retour d'expérience du maître d'ouvrage, des exigences de certifications environnementales. Elles sont à intégrer dans le programme de l'opération.

Impact de l'environnement extérieur

Une fois que les exigences dues à la typologie du bâtiment auront été analysées, il s'agira de réfléchir aux impacts du choix du site.

La quantité de lumière naturelle disponible à l'intérieur d'un local est la somme de la lumière provenant :

- du soleil,
- de la voûte céleste,
- des réflexions sur les surfaces extérieures,
- des réflexions sur les surfaces intérieures du local.

Plus la composante directe, c'est-à-dire le rayonnement solaire direct et la lumière provenant de la voûte céleste, est importante, plus la qualité de l'éclairage naturel dans le local sera considérée comme satisfaisante. Il en résulte que plus les masques extérieurs sont proches et importants, plus la composante directe et donc l'éclairage naturel à l'intérieur du local sera faible. On peut considérer que si un local fait face à une obstruction qui ne dépasse pas 25° au-dessus de l'horizon alors le potentiel d'éclairage naturel du local sera favorable. Dans le cas contraire, il faudra évaluer avec attention l'impact de l'obstruction sur la qualité de l'éclairage naturel du local [Littlefair, 2002].

Le cas d'une réhabilitation est, bien entendu, plus contraignant qu'une construction neuve car les possibilités sont limitées par la concep-

tion originale du bâtiment. À ce titre, le référentiel de certification NF Bâtiments Tertiaires - Démarche HQE® requiert dans sa version générique 2011 des exigences plus souples pour les performances en l'éclairage naturel que pour des constructions neuves.

L'environnement extérieur peut par ailleurs poser des problèmes également dans le cas d'une construction neuve lorsque le projet est situé dans un contexte fortement urbanisé. Dans ces situations, il faudra réfléchir à des solutions permettant d'apporter un maximum de lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment. La forme du bâtiment lui-même devra être pensée de manière soignée pour pallier aux contraintes imposées par l'environnement extérieur. L'utilisation d'éclairage zénithal, de puits de lumières ou encore la création d'un atrium, sont autant de moyens qui pourront permettre d'optimiser l'éclairage naturel sur un site défavorisé.

Orientation et positionnement des locaux

En fonction de son usage, un local n'aura pas les mêmes contraintes et exigences vis-à-vis de l'éclairage naturel. Il est essentiel de mener une réflexion sur la position de chaque type de local par rapport aux baies.

Pour éviter les surchauffes et l'éblouissement, certains pourront préférer des orientations Nord pour les bureaux par exemple. Il a cependant été montré que les usagers apprécient la présence de rayonnement solaire direct sur leur lieu de travail. Ainsi, les locaux orientés Nord peuvent par exemple accueillir des espaces à occupation intermittente comme des salles de réunion ou de restauration.

Des bureaux offrant d'autres orientations devront être équipés de protections solaires pour éviter les surchauffes et éblouissement, les stores mobiles étant souvent un bon compromis.

Il a parfois été observé que des locaux comme les sanitaires, des salles d'archives ou encore les gaines d'ascenseurs étaient localisées direc-

tement sur la façade. Même s'il est agréable de bénéficier de lumière naturelle dans les sanitaires, il est vraisemblablement plus adapté de positionner ce type de locaux dans les parties centrales des bâtiments où la lumière naturelle est absente et d'y positionner à la place des locaux à occupation permanente.

Formes et dimensions des bâtiments et des locaux / aménagement intérieur

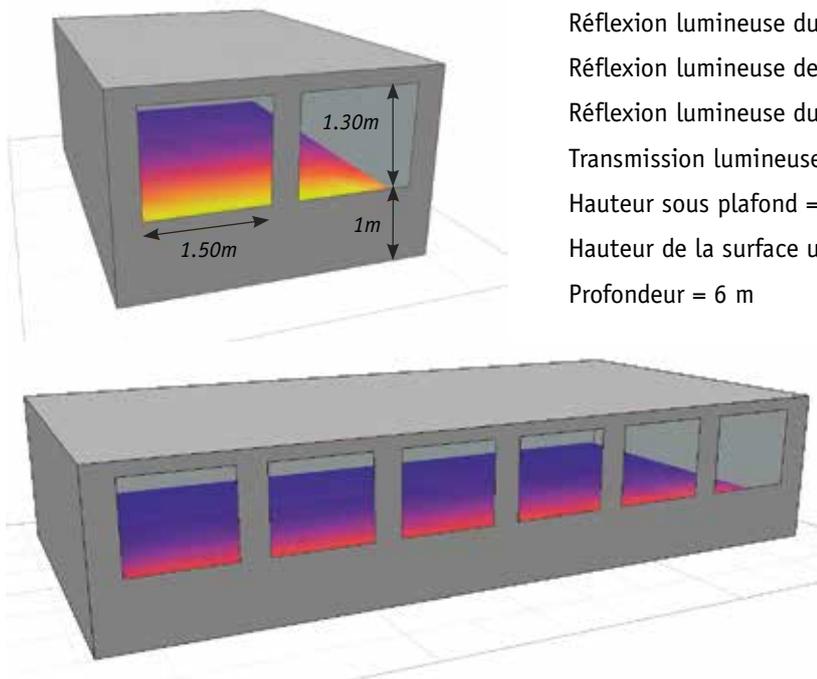
Le premier paramètre à prendre en compte est la forme globale du bâtiment lui-même. Par exemple, la profondeur de 18 m des bâtiments de bureaux standards qui résulte d'un arbitrage technico-économique peut générer jusqu'à un tiers de locaux aveugles dans la partie centrale selon les choix d'aménagement intérieurs et la hauteur utile. À l'inverse, un bâtiment d'une profondeur de 14 m et d'une hauteur sous lin-

teau de 2,5 m permettra d'offrir un éclairage naturel à la majorité des locaux.

La géométrie d'un local est également un paramètre influant sur l'éclairage naturel. Elle est souvent liée à la fonction du local lui-même. Cependant, plus un local est profond et étroit, plus il sera difficile d'y obtenir une bonne répartition et pénétration de la lumière naturelle en fond de pièce, même si sa façade est entièrement vitrée. Ce phénomène est dû aux effets de masques créés par les murs qui sont d'autant plus importants que le local est étroit.

Sur une même façade et à profondeur égale, l'éclairage naturel dans un bureau étroit sera toujours moindre que dans un bureau plus large. Observons ce phénomène à l'aide d'un exemple où nous comparons les performances d'un bureau à 2 trames avec un bureau à 6 trames.

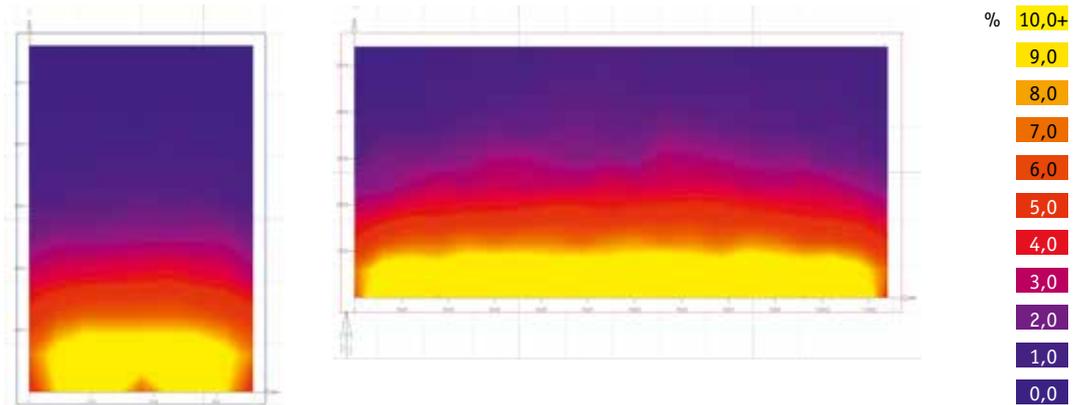
Vue 3D des locaux étudié



Hypothèses de simulation

- Réflexion lumineuse du sol = 30 %
- Réflexion lumineuse des murs = 50 %
- Réflexion lumineuse du plafond = 70 %
- Transmission lumineuse du vitrage = 70 %
- Hauteur sous plafond = 2,5 m
- Hauteur de la surface utile = 0,70 m
- Profondeur = 6 m

Résultats



Il est cependant important de comprendre que dans le cas du cloisonnement d'un plateau de bureau paysager, la profondeur des locaux est souvent réduite pour inclure une circulation à l'extérieur du local. Par conséquent, les conditions d'éclairage naturel seront globalement meilleures dans le cas d'un local étroit et moins profond que dans un local de plus grandes largeur et profondeur.

À ce titre, il est intéressant de comparer les performances de locaux, un large et étroit ayant la même profondeur avec un autre local

dans lequel la profondeur est diminuée de 2 m. Nous vérifions également le niveau de performance atteint selon les exigences de certification environnementales relatives au facteur de lumière du jour des référentiels BREEAM International 2009 et HQE Générique 2011.

Comme évoqué dans le chapitre 6, ces résultats chiffrés nous indiquent que la démarche BREEAM n'encourage pas les locaux profonds et étroits alors que la démarche HQE sera moins pénalisante.

	Local 6 trames (P = 6 m)	Local 2 trames (P = 6 m)	Local 2 trames (P = 4 m)
FLJ moyen (%)	4,17	3,62	5,31
FLJ mini (%)	0,82	0,66	1,58
Uniformité	0,196	0,182	0,297
Performance atteinte	HQE Cible 10.1.3 Niveau TP BREEAM Hea1 atteint	HQE Cible 10.1.3 niveau P BREEAM Hea1 non atteint	HQE Cible 10.1.3 Niveau TP BREEAM Hea1 atteint

Dispositifs d'éclairage naturel

Une fois établi le cahier des charges analysant les exigences et contraintes concernant la lumière naturelle, l'étape suivante consistera à proposer des dispositifs d'éclairage naturel performants et adaptés au projet. Nous en détaillons ci-après les principaux.

Les ouvertures en façade

Même s'il n'est pas le plus efficace, la baie vitrée en façade est le moyen le plus simple et le plus répandu d'apporter de la lumière naturelle à l'intérieur d'un local. Cependant, une grande surface de vitrage sur une façade ne permet pas à elle seule de définir si l'éclairage naturel sera optimisé. En complément, il convient d'en paramétrer précisément

- l'orientation et l'inclinaison,
- la position,
- la forme et les dimensions,
- les matériaux de transmission,
- le type de menuiserie.

L'orientation et l'inclinaison des ouvertures

La variabilité des répartitions de luminances sur la voûte céleste implique que l'orientation et l'inclinaison d'une baie, à taille identique, auront un impact sur le flux de lumière naturelle qui la traverse.

Orientation	E/O	N	Horizontale
Ratio	0,70	0,34	1,30

Variation d'éclairement annuel global selon les orientations relativement à la façade Sud (données Météonorm pour Clermont-Ferrand)

Les ouvertures en toiture sont celles qui peuvent apporter le plus de lumière naturelle pour une même surface et les orientations Nord sont les plus défavorisées.

Néanmoins, la problématique de l'orientation ne peut pas se résumer à une quantité de lumière, il est important de noter que :

- la dynamique de la lumière naturelle (niveau d'éclairement et température de couleur) est plus faible au nord qu'au sud, ce qui peut être ressenti de façon différente selon les individus,
- l'éblouissement est plus facile à gérer au sud qu'à l'est et à l'ouest où le soleil est plus bas sur l'horizon, ce qui permet de conserver plus longtemps la vue sur l'extérieur,
- l'orientation nord simplifie la problématique de la gestion des protections dans les espaces partagés mais la faible pénétration de rayonnement solaire direct peut être perçue par certains individus comme frustrante,
- les baies horizontales en toiture peuvent générer des surchauffes importantes. Pour y remédier, des protections solaires extérieures peuvent être préconisées, celles-ci diminuent cependant les apports de lumière naturelle.

Conseils de l'ICEB :

Dans les logements, on évitera les ouvertures au nord dans les pièces de vie et on préférera des orientations multiples dans la mesure du possible.

Dans les bâtiments tertiaires, le contrôle et la gestion de la lumière naturelle et des apports solaires est plus facile au nord et au sud. Pour les orientations est et ouest, les ouvertures devront être impérativement équipées de protections solaires mobiles. Dans le cas d'apports internes importants (notamment par les équipements de bureautique), l'orientation nord devrait être favorisée car la lumière naturelle est plus stable donc plus facile à gérer et permet ainsi les meilleurs gains sur l'éclairage artificiel et un confort d'été avec utilisation minimisée de la climatisation.

La position des ouvertures

La position des ouvertures sur la façade aura un impact sur la répartition de la lumière naturelle dans le local qu'elles éclairent.

Les impostes permettent à la lumière naturelle d'entrer plus en profondeur dans un local. En revanche, les ouvertures situées en dessous de la hauteur du plan utile auront peu d'impact sur la quantité de lumière qu'il recevra. On observe également qu'une zone d'ombre est créée sous l'allège dans le cas d'ouvertures trop hautes.

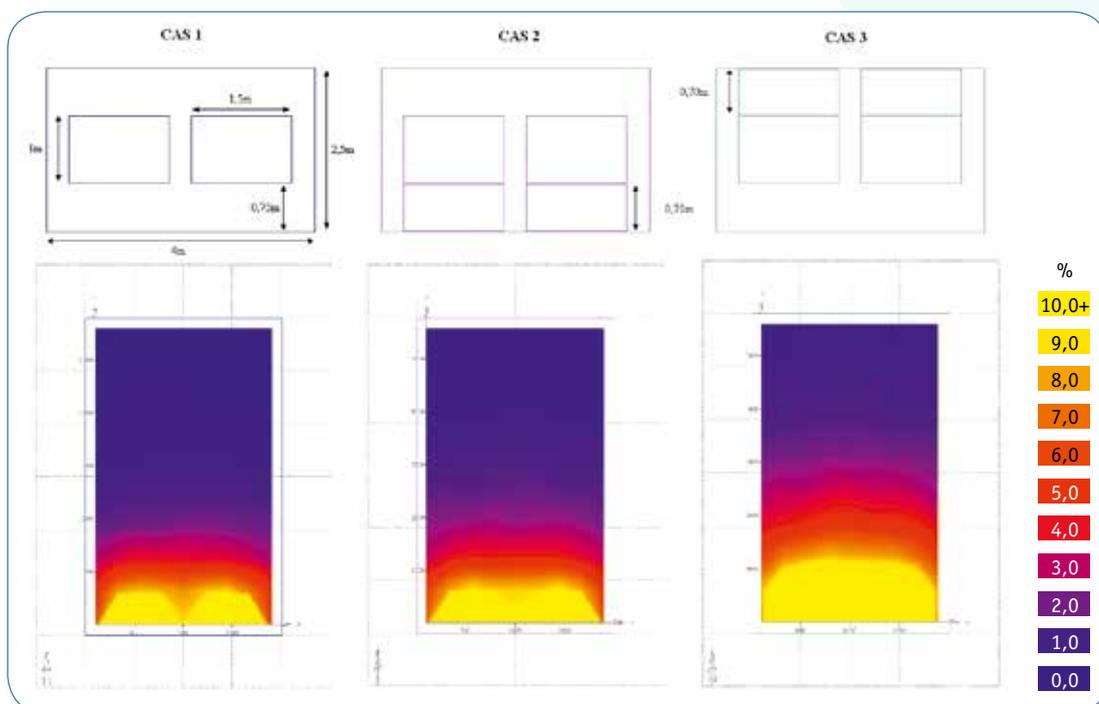
Ces simulations nous montrent qu'une allège vitrée est peu efficace sur l'éclairage naturel. En revanche, la combinaison d'une fenêtre en imposte et une à hauteur d'œil est la configuration optimale pour l'éclairage naturel.

La forme et la dimension des ouvertures

Une forme d'ouverture optimisée peut augmenter la qualité de l'éclairage naturel en limitant les effets de contrastes et les zones d'ombres. On préférera :

- une fenêtre large à la place de plusieurs petites fenêtres étroites afin de limiter une succession de contrastes forts,
- à surface vitrée égale, on choisira une forme de baie et une position sur le mur qui offre, dans la mesure du possible, une vue sur le sol extérieur, le paysage et le ciel.

De plus, les baies de grande dimension auront une proportion de cadre moins importante, ce qui limite les déperditions thermiques et augmente l'apport de lumière naturelle, la menuiserie pouvant représenter jusqu'à 25 % de la surface de l'ouverture en cas de baies étroites.



Comparaison de la répartition des facteurs de lumière du jour pour trois configurations de prise de jour en façade (profondeur du local = 6 m)

Les matériaux de transmission

Le vitrage clair :

La transmission lumineuse du vitrage est une donnée technique variant en fonction du matériau utilisé et de son traitement : verre feuilleté, verre coloré, couche réfléchissante) entre autres. Les éventuels traitements de surface rapportés tels que la sérigraphie par exemple, font chuter de façon très sensible la transmission lumineuse.

La transmission lumineuse globale de la baie tient compte de la portion de cadre et des éventuels compléments vitrage fixes, les compléments mobiles entièrement escamotables n'étant pas pris en compte. La transmission lumineuse globale est le produit de la transmission des différents filtres successifs de la baie.

Le vitrage diffusant :

Il faut noter que dans certains cas, l'utilisation d'un vitrage diffusant peut être plus adaptée qu'un vitrage clair. Même si la transmission lumineuse d'un vitrage diffusant est inférieure à celle d'un vitrage clair d'environ 40 %, il permettra par exemple de diffuser le rayonnement solaire direct et ainsi d'améliorer l'uniformité en éclairage naturel du local et les niveaux en fond de pièce. Il conviendra cependant de veiller aux phénomènes d'éblouissement qui peuvent apparaître dans le cas d'un vitrage à cause de la luminance potentiellement élevée de la surface vitrée. Si l'absence de vue sur l'extérieur avec ce type de vitrage peut être considérée comme un problème, une solution optimale pourrait consister à spécifier un vitrage diffusant en imposte pour diffuser la lumière naturelle et l'amener en fond de pièce et une partie en vitrage clair à hauteur du regard pour conserver une vue sur l'extérieur.

Noter également que si, dans le cas d'un vitrage clair, la position de celui-ci par rapport au nu extérieur impacte peu la pénétration de la lumière naturelle, il n'en va pas de même pour un vitrage diffusant. En effet, un vitrage diffusant sera plus efficace s'il est dans le plan du nu extérieur où il captera un maximum de flux lumineux extérieur avant de le diffuser à l'intérieur.

Autres dispositifs de distribution de la lumière naturelle

Il existe un certain nombre de dispositifs techniques et architecturaux qui permettent d'apporter ou de redistribuer la lumière naturelle dans un local, en voici une liste non exhaustive.

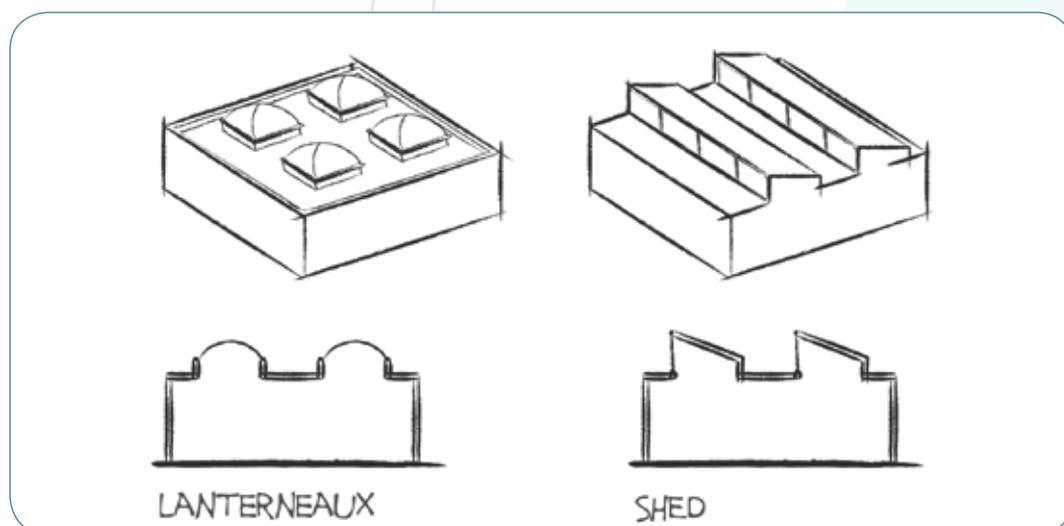
Le second jour



Apport de lumière naturelle par second jour (Lycée Robert Schuman à Charenton © Brindel-Beth. Architecte : EPICURIA et MALISAN)

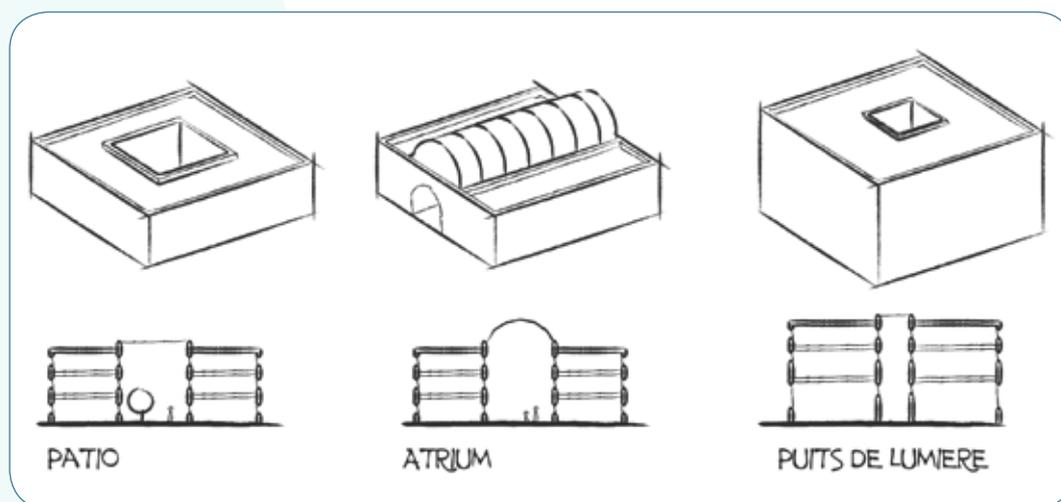
Principe	Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Apport de lumière naturelle par une ouverture donnant sur un espace bénéficiant de lumière du jour directement depuis l'extérieur.	Permet de créer une impression de lumière naturelle dans un local privé de premier jour et de le faire bénéficier de la dynamique de la lumière naturelle.	N'offre pas (ou rarement) de vue sur l'extérieur. Ne permet pas d'obtenir des niveaux d'éclairage suffisants pour effectuer une tâche visuelle.	Dispositif adapté aux locaux à occupation passagère comme par exemple les circulations ou les espaces reprographie. Ou encore locaux avec premier jour éclairés en fond de pièce par une circulation adjacente (voir photo p.51).

Les sheds et lanterneaux



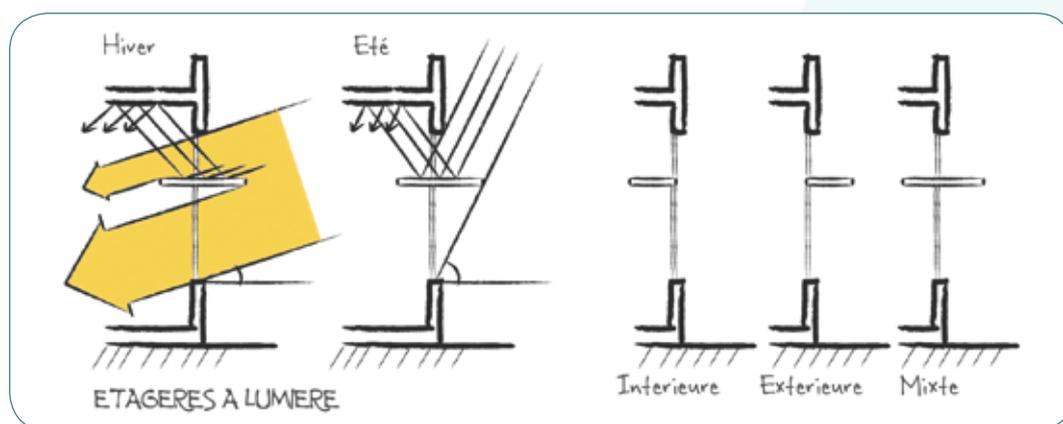
Principe	Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Apport de lumière naturelle zénithale par une ouverture donnant sur l'extérieur.	À surface égale, les prises de jour horizontales permettent d'offrir deux fois plus de lumière qu'une fenêtre verticale. Bon moyen d'améliorer l'uniformité en fond de pièce ou d'apporter de la lumière naturelle dans les circulations du dernier niveau d'un bâtiment.	N'offrent pas de vue sur l'extérieur. Des déperditions et surchauffes peuvent être générées. Il conviendra de choisir un facteur solaire adapté, notamment par une protection solaire extérieure. Possibilité d'éblouissement par le soleil direct au travers des lanterneaux si le vitrage n'est pas diffusant.	Pour les sheds, veiller à orienter l'ouverture au nord pour ne pas laisser pénétrer le rayonnement solaire direct. Choisir un coefficient de réflexion lumineuse le plus élevé possible pour les costières des lanterneaux.

Les atriums/patios et puits de lumière



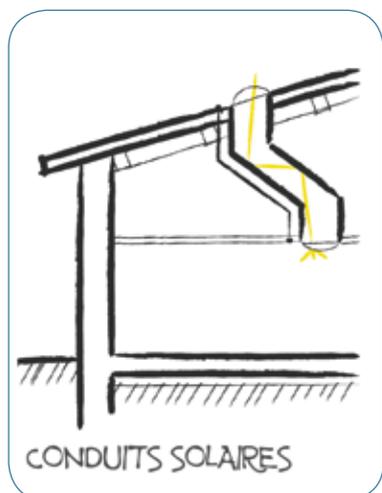
Principe	Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Apport de lumière naturelle par un volume extrudé plus ou moins grand au cœur d'un bâtiment.	La création d'un atrium/patio au centre d'un bâtiment peut être une solution adaptée dans le cas d'une construction à la géométrie compacte (i.e. carrée).	N'offre pas ou peu de vue sur l'extérieur. L'apport de lumière naturelle chute rapidement d'un étage à l'autre (diminution rapide de la composante directe). Peut poser des problèmes de vis-à-vis et d'intimité.	Préférer cette solution pour des bâtiments peu élevés ou veiller à ce que la largeur du patio/atrium soit supérieure à la hauteur du bâtiment. Veiller à choisir un coefficient de réflexion lumineuse élevé pour les parois et le sol. Préférer un patio ouvert à un atrium fermé qui pourra diminuer jusqu'à 30 % la quantité de lumière naturelle.

Les étagères à lumières



Principe	Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Dispositif permettant de rediriger la lumière naturelle en fond de pièce à l'aide d'un plan réfléchissant positionné sur une baie (généralement un tiers de la hauteur de la fenêtre sous le linteau) et perpendiculairement (ou légèrement incliné) à celle-ci.	Diminue les niveaux d'éclairciment élevés à proximité de la fenêtre et améliore donc l'uniformité. Permet d'apporter de la lumière naturelle en fond de pièce. Peut servir de brise-soleil en été sur une façade sud. Permet de bénéficier des apports solaires en hiver sur une façade sud.	Dans le cas d'une étagère à lumière couplée à un brise-soleil, les performances du système peuvent chuter rapidement si un entretien et un nettoyage régulier ne sont pas effectués	Préférer la mise en place de ce système sur une façade sud.

Les conduits à lumière



Principe	Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Tube en matériau ultra réfléchissant (classiquement de l'aluminium) qui collecte la lumière en toiture et la conduit dans le bâtiment.	Permet d'apporter de la lumière naturelle dans des locaux défavorisés ou en fond de pièce. Un système performant pourra apporter de la lumière naturelle à travers plusieurs étages.	Le rendement peut chuter rapidement si le tube est long. Des déperditions thermiques et problèmes d'étanchéité à l'air peuvent apparaître si la mise en œuvre n'est pas soignée.	Maximiser le coefficient de réflexion lumineuse des parois du tube (supérieur à 0,95) pour une efficacité maximale. Veiller à une bonne isolation thermique sur toute la longueur. Pour un rendement efficace (> 50 %), il est conseillé de choisir un ratio longueur/diamètre inférieur à 10.

Comparaison de différents dispositifs

Chacun des dispositifs détaillés ci-dessus permet de répondre à des besoins précis. Voyons à présent comment les performances d'une sélection de ces systèmes évoluent comparativement à l'intérieur d'un local. Le cas de base (cas 4) est celui d'une salle de classe de 8 m de profondeur, sans masque extérieur, dont la proportion de vitrage placée au-dessus de l'allège correspond à 16 % de la surface de la façade.

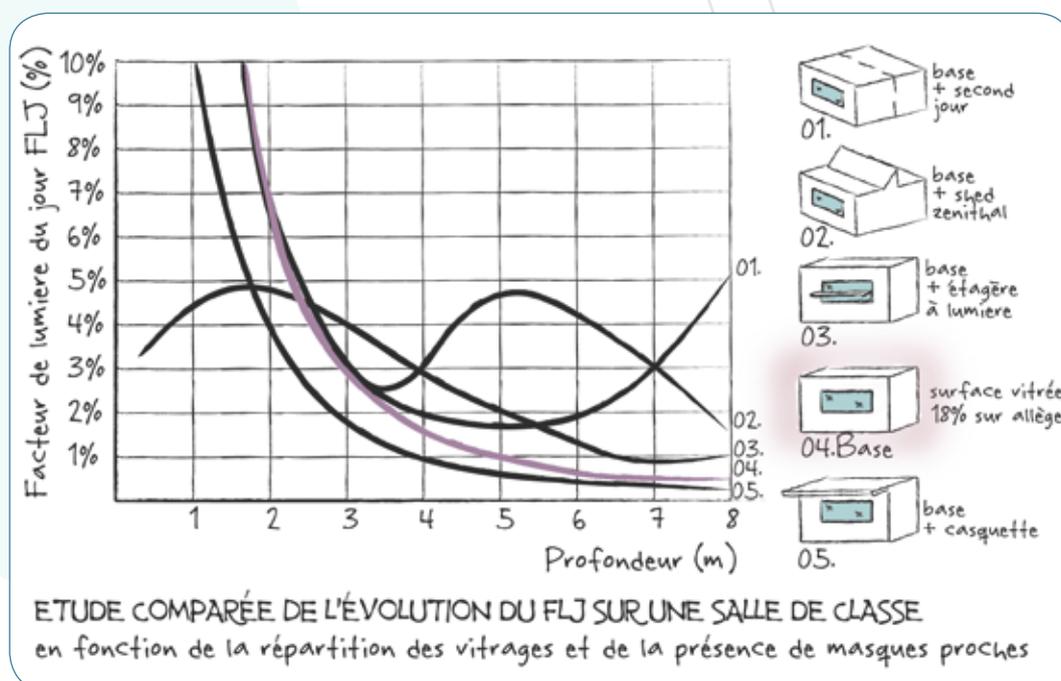
En ajoutant un second jour sur le mur opposé qui donne sur une circulation éclairée en zénithal, on constate que les niveaux de FLJ augmentent considérablement en fond de pièce. Ce dispositif permet d'améliorer l'uniformité ainsi que le niveau moyen.

Si l'on ajoute un shed au cas de base (cas 2), on constate que les niveaux de FLJ augmentent considérablement dans la seconde partie

du local. L'uniformité et le niveau moyen de FLJ sont améliorés. L'impression de clarté et d'uniformité sera par ailleurs considérablement améliorée avec ce type de dispositif.

En ajoutant une étagère à lumière sur la façade (cas 3) les niveaux à proximité de la fenêtre sont diminués et ceux en fond de pièce sont augmentés permettant ainsi d'offrir au local une meilleure uniformité.

Avec un brise-soleil extérieur fixe autrement appelé « casquette » sur la façade (cas 5), les niveaux de FLJ diminuent à proximité de la façade et l'impact en fond de pièce est négligeable par rapport au cas de base. Avec ce dispositif, c'est surtout le FLJ moyen qui est déprécié.



Source : Tribu

Matériaux de l'enveloppe intérieure du local

En dehors des baies et autres dispositifs de captation de lumière naturelle, les caractéristiques des matériaux de finitions d'un local doivent aussi être prises en compte dans le paramétrage de l'éclairage naturel.

Les coefficients de réflexion des sols, murs, plafonds doivent être définis en amont du projet. On favorisera des teintes claires pour augmenter la composante réfléchie interne de l'éclairage naturel. Un contrôle des matériaux et des couleurs choisis sur le chantier doit permettre de valider les hypothèses prises en compte dans le calcul.

Classiquement, dans un bâtiment de bureau, on prendra par défaut des valeurs de coefficient de réflexion lumineuse de 0,2 pour le sol, 0,5 à 0,6 pour les murs et 0,7 à 0,8 pour le plafond.

Un exemple

Pour illustrer l'importance des coefficients de réflexion lumineuse des parois, une étude paramétrique a été menée sur l'impact du choix du revêtement de sol sur l'autonomie lumineuse d'un local (De Luminae : Réhabilitation de la tour Gallieni à Bagnolet). Les simulations au pas horaire sur l'année montrent que, pour un climat parisien, l'autonomie lumineuse à 300 lux sur le plan utile peut être améliorée jusqu'à 20 % pour la zone de fond de pièce si l'on choisit pour revêtement de sol un moquette claire ($\rho = 0,2$) plutôt qu'une moquette sombre ($\rho = 0,03$).

Le coefficient de réflexion des moquettes, même claires, dépasse rarement la valeur de 0,3. Les facteurs de réflexion des murs et des plafonds sont le plus souvent nettement supérieurs.

D'autres types de sol plus lisses du marché (bois, carrelages, terre cuite, divers sols vinyles, etc.) peuvent avoir des facteurs de réflexion plus élevés jusqu'à 0,7.

Un coefficient de réflexion adapté (entre 20 et 40 %) sera plus facilement atteint avec un revêtement de sol lisse de type linoléum ou carrelage. Il faut néanmoins éviter pour les revêtements de sols les couleurs trop claires et les surfaces brillantes qui augmentent les risques d'éblouissement.

L'influence et le poids comparé des facteurs de réflexion des différents types de parois (sol, mur, plafond) dépendent du type de ciel et de la typologie des compléments de vitrage (exemple : étagères à lumière) qui peuvent dévier la lumière vers le haut et valoriser un facteur de réflexion élevé en plafond.

Les protections solaires

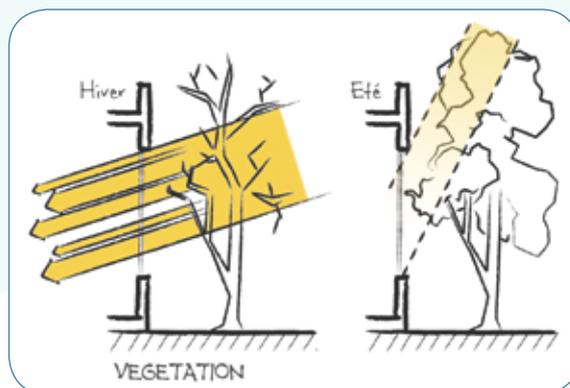
Les protections solaires peuvent prendre de multiples formes, elles répondent généralement aux objectifs suivants :

- La limitation de l'éblouissement ;
- La diminution des surchauffes ;
- La préservation de l'intimité des occupants ;
- L'occultation des locaux ;
- Le parti architectural ;
- L'augmentation du pouvoir isolant.

On distingue deux familles de protections solaires : les protections fixes et mobiles.

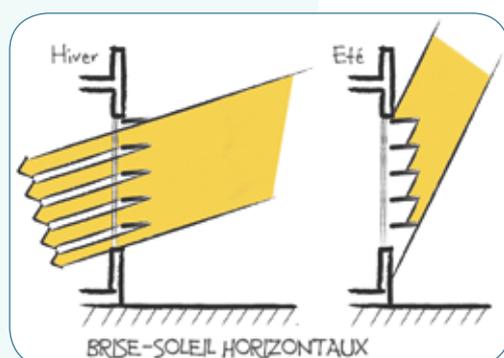
Les protections solaires fixes

La végétation



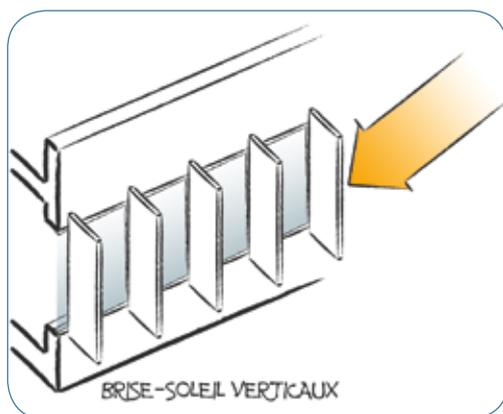
Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
<p>Pour les niveaux bas d'un bâtiment, une végétation à feuilles caduques peut bloquer le rayonnement solaire direct au printemps et en été et le laisser passer en hiver de manière à bénéficier des apports solaires.</p> <p>Faible coût de mise en œuvre.</p>	<p>Des végétaux trop denses peuvent diminuer l'éclairage naturel de manière drastique en été, incitant les usagers à utiliser l'éclairage électrique.</p> <p>Les étages hauts sont moins bien protégés.</p>	<p>Veiller au bon dimensionnement et positionnement des végétaux pour ne pas trop assombrir le local en été.</p> <p>Élagage régulier à prévoir.</p>

Brise-soleil horizontaux extérieurs



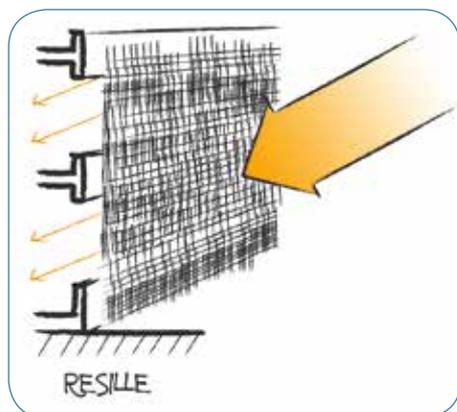
Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
<p>Si l'orientation est franche (plein sud) et que le système est bien dimensionné, il permet de bloquer la pénétration du rayonnement solaire direct au printemps et en été pour éviter les surchauffes.</p> <p>Permet également de bénéficier des apports solaires en période d'automne et d'hiver.</p>	<p>Diminue la composante diffuse de la lumière naturelle.</p> <p>Éclairages médiocres sous des conditions de ciel couvert.</p> <p>Parti architectural fort.</p>	<p>Ne préconiser que pour une orientation sud.</p> <p>Peut être couplé avec un système d'étagère à lumière.</p> <p>Une protection solaire mobile intérieure est recommandée en complément pour prévenir la gêne potentielle due à la pénétration du rayonnement solaire direct en automne et en hiver et les situations d'éblouissement.</p>

Brise-soleil verticaux extérieurs



Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Permet de réduire considérablement la pénétration du rayonnement solaire direct.	Fort impact sur l'éclairage naturel et la vue sur l'extérieur. Éclairages médiocres sous des conditions de ciel couvert. Selon la position des usagers à l'intérieur, la vue sur l'extérieur peut être très réduite, à moins d'utiliser des panneaux perforés. Parti architectural fort.	A préconiser sur les façades est et ouest uniquement. S'assurer de la bonne inclinaison et du bon dimensionnement des lames en fonction de l'orientation de la façade pour un maximum d'efficacité. À éviter dans les locaux à occupation permanente.

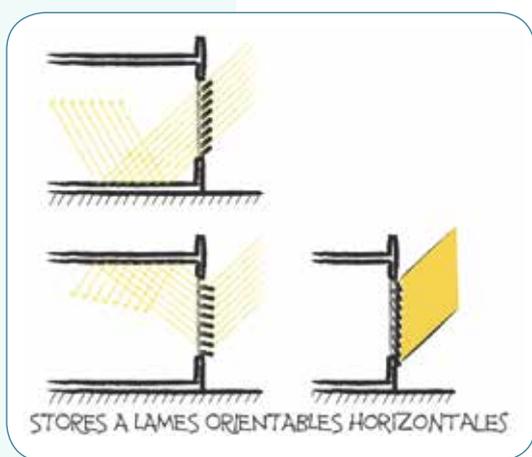
Résille extérieure



Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
En fonction du pourcentage de perforation, le système peut permettre de bloquer le rayonnement solaire direct tout en conservant une vue sur l'extérieur.	Si la protection solaire est forte, l'éclairage naturel sera considérablement réduit dans le local. Dispositif fixe qui ne permet pas de bénéficier de la dynamique de la lumière naturelle. Éclairages médiocres sous des conditions de ciel couvert. Parti architectural fort.	Plus adapté à des façades largement vitrées. À éviter dans les locaux à occupation permanente.

Les protections solaires mobiles

Stores à lames horizontales



Les stores à lames peuvent être positionnés à l'extérieur, à l'intérieur ou encore dans la lame d'air d'un double ou triple vitrage.

Avantages communs à ces trois solutions :

- permettent de bloquer le rayonnement solaire direct tout en conservant une vue sur l'extérieur si les lames sont bien orientées,
- transmission et distribution lumineuse variable qui permet de bénéficier de la dynamique de la lumière naturelle.

Il est important de noter qu'un store à lames sombres laissera pénétrer jusqu'à deux fois moins de lumière naturelle qu'un store à lames claires.

Stores extérieurs

Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Efficacité optimale contre les surchauffes dues au rayonnement solaire direct. Permettent la ventilation naturelle tout en se protégeant des surchauffes.	Parti architectural fort. Soumis aux intempéries.	Un entretien régulier est nécessaire à un bon fonctionnement. Pilotage par GTC pour une efficacité optimale.

Stores intérieurs

Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Maintenance plus aisée qu'un store extérieur. Très efficace contre l'éblouissement.	Efficacité limitée contre les surchauffes dues au rayonnement solaire direct.	Mise en œuvre plus facile qu'un store extérieur.

A l'intérieur d'un double vitrage

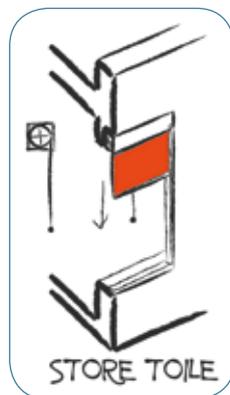
Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Meilleure durabilité.	L'augmentation de température dans la lame d'air peut entraîner un dysfonctionnement du moteur. Maintenance difficile.	Solution coûteuse et permanente.

Toutes considérations prises en compte, le store extérieur reste la meilleure solution.

Stores à lames verticales

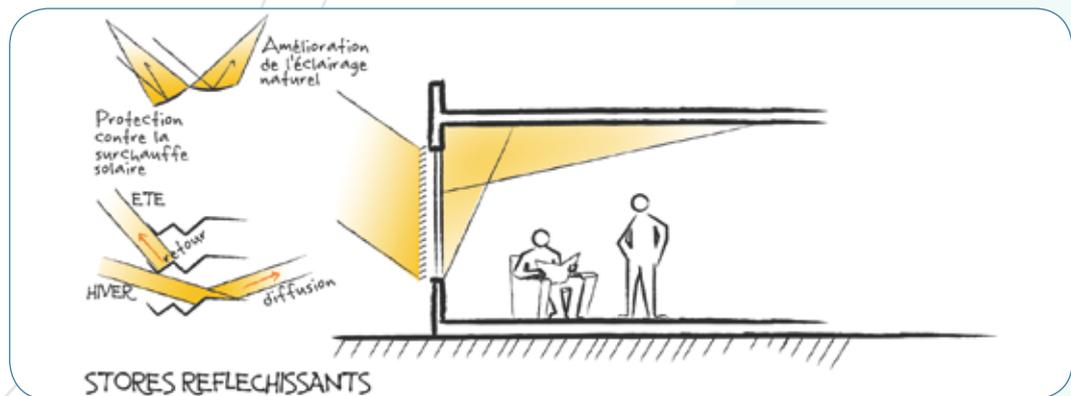
Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Si bien orientés, peuvent permettre de bloquer le rayonnement solaire direct tout en conservant une vue sur l'extérieur.	Efficacité limitée contre les apports solaire car localisés à l'intérieur.	Préférable pour des orientations est et ouest.

Stores en toile



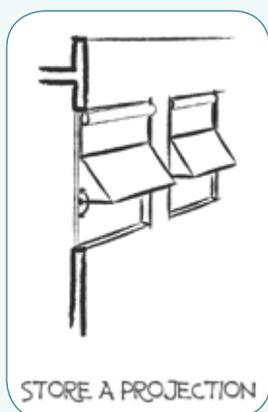
Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Différents degrés de perforation sont disponibles. La vue vers l'extérieur est conservée lorsqu'ils sont fermés. Efficaces contre les apports solaires si positionnés à l'extérieur.	Ventilation naturelle peu efficace lorsqu'ils sont fermés. Sensibles aux intempéries si positionnés à l'extérieur	Maintenance régulière requise. Éviter les couleurs franches pour ne pas modifier la température de couleur de la lumière naturelle entrant dans le local.

Stores réfléchissants ou à réorientation



Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Optique soignée qui permet d'optimiser l'éclairage naturel en toute saison	Système coûteux	Une mise en œuvre et maintenance par des spécialistes peut être nécessaire. Utilisation différente en fonction de l'orientation de la façade.

Stores à projection en toile



Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
<p>Permet de bénéficier d'une protection solaire efficace tout en conservant une vue sur l'extérieur.</p> <p>Permet un bon éclairage naturel notamment grâce aux réflexions sur le sol extérieur.</p> <p>Offre une ventilation naturelle efficace.</p>	Sensible aux intempéries.	Similaire aux stores en toile extérieurs

Facteur solaire et comparatif des protections classiques

Le tableau ci-dessous donne les ordres de grandeur du facteur solaire, FS, des vitrages et protections solaires associées à des vitrages clairs.

Type de vitrage	Traitement du verre	Film solaire	Toile intérieure	Store à lame intérieure	Toile extérieure	Store à lame extérieur	Type de verre + lame verticale
Simple vitrage clair Fs = 0,85	Verre absorbant neutre Fs = 0,61	Double vitrage + IR Fs = 0,65	Sombre Fs = 0,7	Sombre Fs = 0,65	Sombre Fs = 0,15	Sombre Fs = 0,19	Absorbant neutre + lame verticale intérieure claire Fs = 0,47
Double vitrage clair Fs = 0,73	Verre réfléchissant argent Fs = 0,4	Double vitrage + 2 IR Fs = 0,55	Couleur intermédiaire Fs = 0,5	Couleur intermédiaire Fs = 0,55	Couleur intermédiaire Fs = 0,15	Couleur intermédiaire Fs = 0,13	Réfléchissant argent + lame verticale intérieure claire Fs = 0,33
Triple vitrage clair Fs = 0,69	Verre réfléchissant neutre Fs = 0,34		Couleur claire Fs = 0,3	Couleur claire Fs = 0,48	Couleur claire Fs = 0,2	Couleur claire Fs = 0,13	Réfléchissant neutre + lame verticale intérieure claire Fs = 0,26

Le rayonnement visible formant environ la moitié du rayonnement énergétique global, le facteur solaire ne peut être inférieur à la moitié de la transmission lumineuse. À titre indicatif, le tableau ci-après donne les transmissions lumineuses et facteurs solaires pour différents types de doubles vitrages.

	Transmission lumineuse (%)	Facteur solaire
Double vitrage clair	70	0,75
Double vitrage à contrôle solaire	66	0,34
Double vitrage réfléchissant	18	0,22

Caractéristiques de doubles vitrages. Source ADEME [ADEME, 2003]

Performances énergétiques et lumineuses & orientation

Sur la base des données d'études de Le Sommer Environnement, l'ICEB propose des valeurs optimisées de déperditions de l'enveloppe, facteur solaire et transmission lumineuse en fonction de l'orientation de la façade pour la région Île-de-France.

	Nord	Sud
U (W/m ² .K)	U _{mur} ≈ 0,2 U _w ≈ 1,6	U _{mur} ≈ 0,2 U _w ≈ 1,6
Facteur Solaire	FS _{été} ≈ 0,25** FS _{hiver} ≈ 0,6*	FS _{été} ≈ 0,15** FS _{hiver} ≈ 0,6*
Transmission Lumineuse	TL _{été} ≈ 0,7* TL _{hiver} ≈ 0,7*	TL _{été} ≈ 0,1** TL _{hiver} ≈ 0,7*

*double vitrage sans store

**double vitrage avec store fermé

Régulation et interaction avec les utilisateurs

Régulation et contrôle

Le mode de contrôle d'une protection solaire mobile sera déterminant sur son efficacité. Il existe plusieurs moyens de contrôler une protection solaire.

Commande manuelle

Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
Mise en place simple. Prise en main facile par les utilisateurs. L'utilisateur contrôle l'éclairage naturel de son espace.	Les utilisateurs doivent se déplacer pour actionner le store. Une fois le store baissé, il a souvent été observé que les usagers allument l'éclairage électrique plutôt que de remonter le store lorsque la lumière naturelle disponible n'est plus gênante.	Contrôle par cordon, sangle, manivelle ou encore interrupteur mural.

Commande déportée

Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
<p>Mise en place simple.</p> <p>Prise en main facile par les utilisateurs.</p> <p>Gain de confort grâce au contrôle possible depuis le poste de travail.</p>	<p>Une fois le store baissé, il a souvent été observé que les usagers allument l'éclairage électrique plutôt que de remonter le store lorsque la lumière naturelle disponible n'est plus gênante.</p>	<p>Nécessite la motorisation du store.</p> <p>Contrôle par télécommande depuis le poste de travail.</p>

Commande automatisée

Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre
<p>Si bien paramétré, le système peut offrir aux usagers des conditions de confort optimales.</p> <p>Gains énergétiques possibles sur l'éclairage électrique, le chauffage et la climatisation.</p>	<p>Un mauvais paramétrage des seuils de déclenchement peut s'avérer critique pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> • le confort des usagers qui peuvent se sentir agressés par le déclenchement trop fréquent et inopiné des stores, • les consommations énergétiques. 	<p>Nécessite la motorisation du store et la mise en place d'une GTC.</p> <p>Les stores peuvent être contrôlés par :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capteur extérieur qui détecte la présence de soleil direct sur la façade. • Capteur intérieur qui mesure les niveaux d'éclairement et actionne le store à partir d'une consigne donnée. • Capteur anémométrique qui les rétracte lorsque le vent est susceptible de les endommager. <p>Le paramétrage soigné des consignes est essentiel au bon fonctionnement du système.</p> <p>Veiller à ne pas contrôler toutes les façades avec le même capteur extérieur.</p> <p>Fonctionnement optimal lorsque le système offre aux usagers la possibilité de déroger à l'automatisme à l'aide d'un contrôle individuel par télécommande.</p>

La régulation de l'éclairage

Le contrôle des protections solaires est optimal lorsqu'il est couplé avec une régulation automatisée de l'éclairage électrique.

La possibilité de gradation des niveaux d'éclairage électrique permettra aux usagers de bénéficier au maximum de la qualité de la lumière naturelle en la complétant de manière optimisée lorsque les niveaux offerts par celle-ci sont insuffisants. De la même manière que

pour les protections solaires, ce type de gradation peut être automatisé mais doit présenter la possibilité d'être pris en main par l'utilisateur à tout moment.

Par ailleurs, un système d'éclairage dynamique qui permet de faire varier la température de couleur de la lumière produite par le système d'éclairage électrique pourra présenter plusieurs avantages. Le système pourra, par exemple, permettre de réchauffer la lumière naturelle lorsque celle-ci est perçue comme trop froide (comme la lumière provenant d'un ciel bleu au travers d'une baie orientée au nord).

Un tel système pourra également offrir aux usagers une variabilité des températures de couleurs tout au long d'une journée et ainsi leur donner un éclairage stimulant de teinte plutôt froide (après l'heure du déjeuner ou le matin par exemple) ou plus reposant lorsque ceux-ci en ressentent le besoin. Comme évoqué plus haut, un tel système peut être automatisé mais doit offrir une possibilité de dérogation aux usagers.

Idéalement, dans les bureaux, on prévoira une gestion automatisée de l'éclairage électrique prenant en compte le potentiel d'éclairage naturel et la présence des occupants, en tout point du local.

Des économies conséquentes peuvent être réalisées si des systèmes de contrôle d'éclairage artificiel sont mis en place. En fonction du type de contrôle, des gains sur les consommations énergétiques de l'éclairage électrique variant entre 10 et 40 % peuvent être réalisés [CSTB, 2011]. Le système le moins efficace étant un éclairage non gradable couplé à un détecteur de luminosité. L'ajout d'un détecteur de présence et d'un système de gradation peut permettre d'obtenir des gains sur les consommations de l'éclairage électrique allant jusqu'à 40 %.

Les utilisateurs

Que ce soit pour la mise en œuvre des protections solaires ou la commande de l'éclairage artificiel, les utilisateurs ont un impact essentiel dans la réussite finale d'une conception favorisant l'éclairage naturel.

Plusieurs problématiques liées aux usagers sont à prendre en considération :

- Chaque usager a une perception de la lumière qui lui est propre. On peut distinguer des comportements photophile ou photophobe chez chaque individu. Si certains apprécient le rayonnement solaire direct sur leur poste de travail, d'autres auront le réflexe de systématiquement fermer la protection solaire dans ces situations. Des phénomènes identiques sont observés vis-à-vis de l'utilisation de l'éclairage électrique. Ce type de comportement peut rendre la gestion des espaces de travail paysagers difficile. Dans ces situations, la meilleure solution reste d'offrir à chaque usager un contrôle individuel des protections solaires et de l'éclairage électrique (en ajoutant un éclairage d'appoint pour chaque poste de travail par exemple).
- Dans le cas d'une gestion automatisée des protections solaires et de l'éclairage électrique, il est essentiel de donner aux usagers une possibilité de déroger aux consignes du système. Ils peuvent en effet se sentir agressés par les actions de l'automatisme.
- Une bonne utilisation des systèmes de contrôle de l'éclairage naturel et électrique passe avant tout par une sensibilisation adaptée des usagers. Le livret d'accueil peut permettre aux usagers de comprendre les enjeux derrière la conception de l'éclairage et ses systèmes de gestion. Une information détaillée du fonctionnement du bâtiment leur donnera un sentiment de responsabilité. Ils se sentiront ainsi comme un acteur actif de leur espace de travail et de l'environnement en général.
- Au stade de la programmation, il est essentiel de bien comprendre les usagers et leur activité pour permettre le choix des systèmes les plus adaptés.



Exemples concrets de mise en œuvre

Ce chapitre s'attache à montrer quelques bâtiments ou locaux pour lesquels l'approche en éclairage naturel est une composante première du projet architectural. Il s'agit, dans ces exemples, de cerner l'enjeu, d'explicitier la mise en œuvre et de montrer les points forts et les limites du système.

Hall 7 - Parc des expositions de Villepinte

CHAIX et MOREL : architectes, TRIBU : BE environnement

Problématique

L'éclairage naturel sur un hall d'exposition est complexe à aborder car, au-delà des enjeux habituels d'autonomie maximale, s'ajoutent diverses contraintes. D'une part la difficulté de faire admettre aux exposants que l'éclairage naturel puisse cohabiter avec un éclairage commercial et d'autre part, le besoin d'un grand linéaire de cimaises qui rend difficile l'implantation de vitrages en partie basse. L'objectif principal est à minima de permettre que les phases de montage et de démontage qui représentent la majeure partie du temps d'utilisation, puissent se faire sous lumière naturelle.

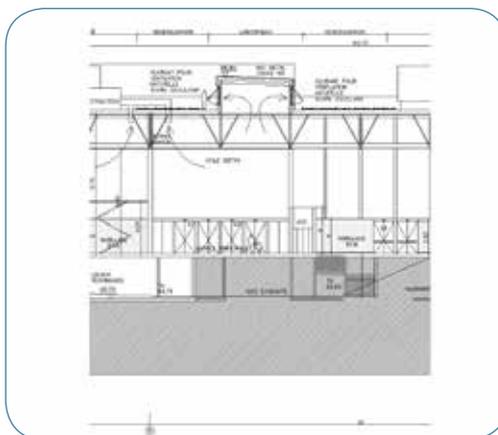
Solution envisagée - Mise en œuvre

Le projet combine des châssis de façade et un lanterneau filant qui joue aussi un rôle de signalétique vis-à-vis des axes de parcours. Le lanterneau se situe en partie centrale. Il permet d'apporter un complément d'éclairage naturel, de réaliser une ventilation naturelle en période nocturne et en cours de montage et de démontage de salon. Les menuiseries de

façade sont équipées de polycarbonate Opal, le lanterneau d'un polycarbonate de type Danpalon Cristal (avec une transmission lumineuse plus élevée). La largeur du shed est celle d'une trame structurelle : 6 m /hauteur : 2,80 m.



Chaix et Morel Architectes - Vue de la toiture - (photo de chantier) © TRIBU



Coupe transversale © Chaix et Morel Architectes

Résultats, limites du système, fonctionnement en ciel clair et en ciel couvert

Les études d'éclairage naturel montrent l'atteinte d'un FLJ moyen de 0,7 %. Le dispositif fonctionne bien. Une autre ligne de shed aurait néanmoins permis d'assurer une plus grande autonomie en éclairage.

Le shed est équipé d'un store occultant, les parties en Danpalon opaques bloquent le rayonnement direct. Il n'y a donc pas d'inconfort en ciel clair.



Parc des expositions de Villepinte - Hall 7 © TRIBU

Centre d'exploitation d'autobus et d'autocar de Transdev – Romainvilliers (77)

NEX Architectes, BET : SEXTANT, AMO HQE : ECO-MAG / AILTER

Problématique

Apporter de la lumière naturelle et des vues sur l'extérieur dans un atelier d'entretien et de maintenance de bus à la fois pour le confort mais aussi pour la sécurité du personnel.

Solution envisagée - Mise en œuvre

Les solutions suivantes ont été mises en œuvre :

- portes sectionnelles entièrement transparentes (double vitrage synthétique Duratec, $U = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$),
- baies vitrées latérales en partie haute, sur les parois perpendiculaires aux portes,

- Skydomes translucides = 12 m^2 , surface utile atelier = $1\,198 \text{ m}^2$ --> Rapport surface translucide sur surface de toiture = 1 %,



Éclairage naturel dans un atelier d'entretien et maintenance de bus et autocar - © B. PLASSE

Résultats, limites du système, fonctionnement en ciel clair et en ciel couvert

L'étude de FLJ faite en conception sur l'atelier montrait qu'avec les portes transparentes, les baies vitrées latérales et 6 m^2 de skydome, le FLJ à l'intérieur de l'atelier était en moyenne de 4,6 %. La large proportion des espaces (80 % de la surface) avait un FLJ supérieur ou égal à 1,5 % et le FLJ minimum sur 100 % de la surface était de 0,8 %.

L'étude montrait cependant une faiblesse de niveau d'éclairage au centre et recommandait d'augmenter la surface de certains skydomes, ce qui a été fait pour répondre à une demande du bureau de contrôle pour la sécurité incendie.

Avec 12 m^2 de skydomes, les résultats étaient améliorés : FLJ moyen de 5,1 %, 80 % de la surface a un FLJ supérieur ou égal à 2,3 %, et le FLJ minimum sur 100 % de la surface est de 1,2 %.

Les risques d'éblouissement à l'ouverture des portes sont réduits par l'éclairage naturel de l'atelier, ce qui permet de minimiser les risques d'accidents aux entrées et sorties des véhicules. En hiver, les arbres situés le long des clôtures nord-ouest et sud-est protègent le bâtiment de la pénétration des rayons rasants.

École du centre Zéro énergie - Pantin

Atelier MEANDRE : architecte, ALTO : BE environnement, TRIBU : AMO HQE

Problématique

En milieu scolaire, les niveaux et la répartition de l'éclairage naturel sur les salles de classes ont une importance primordiale tant dans les processus d'apprentissage que dans les paramètres liés à la santé et au confort offerts aux enfants. L'objectif zéro énergie a conduit la maîtrise d'œuvre (architecte et BET) à travailler conjointement sur l'autonomie lumineuse pour réduire les consommations d'énergie.

Sur l'école du centre de Pantin, cette préoccupation se traduit par des exigences programmatiques fortes en niveau avec une exigence de facteur de lumière du jour minimal de 1,5 %, mais aussi sur la zone d'application, à savoir

toute la surface de la classe à l'exception d'une bande de 1 m en périphérie de la salle.

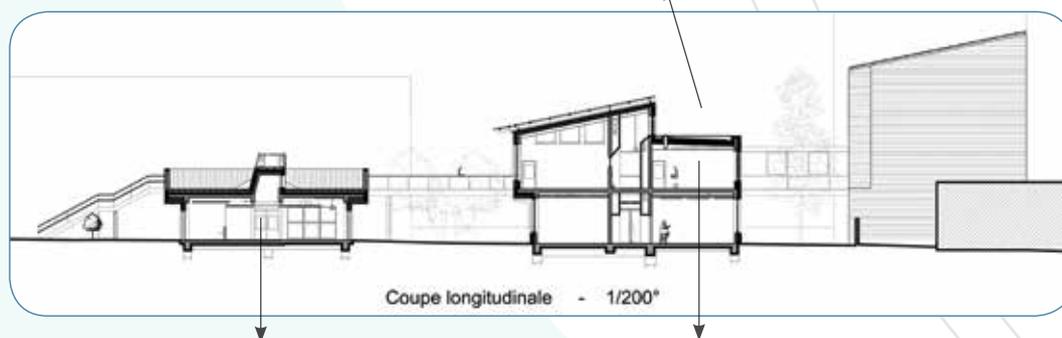
Cet exemple est celui du bâtiment central B (école maternelle et centre de loisirs), soit le plus masqué des trois corps de bâtiment sur le site. Sur ce bâtiment, la faible profondeur des salles de classe (6 m) ne suffit pas à atteindre l'exigence.

Solution envisagée - Mise en œuvre

Suite aux simulations d'éclairage naturel, des compléments par tubes à lumière ont été ajoutés. Des stores extérieurs screen équipent les baies des façades nord et sud.



Les tubes à lumière sur la toiture © O. WOGENSKY



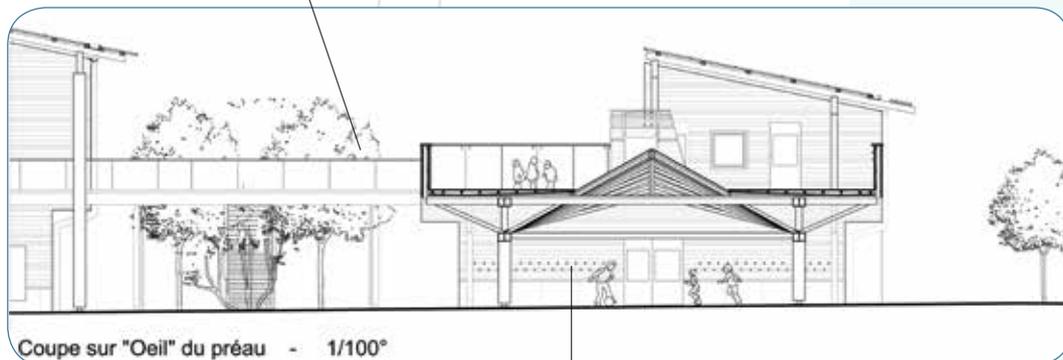
Le réfectoire est éclairé par des édicules avec vitrages verticaux depuis la cour de récréation au R+1
© O. WOGENSKY

Les tubes à lumière apportent un complément d'éclairage naturel aux classes nord © O. WOGENSKY





*Vue depuis la cour de récréation des maternelles.
Les enfants grimpent sur l'œil qui éclaire le préau.
© O. WOGENSKY*



Vue sur « l'œil ». Le préau est éclairé par un soulèvement de la charpente bois © O. WOGENSKY



Résultats, limites du système, fonctionnement en ciel clair et en ciel couvert

Il s'agit d'une classe orientée nord. Les tubes solaires permettent d'apporter un complément efficace mais localisé. Les pertes de rendement dans ce type de produit sont surtout le fait des coudes. Sur une section droite, le système reste efficace sur plusieurs niveaux.

Lycée Robert Schuman – Charenton (94)

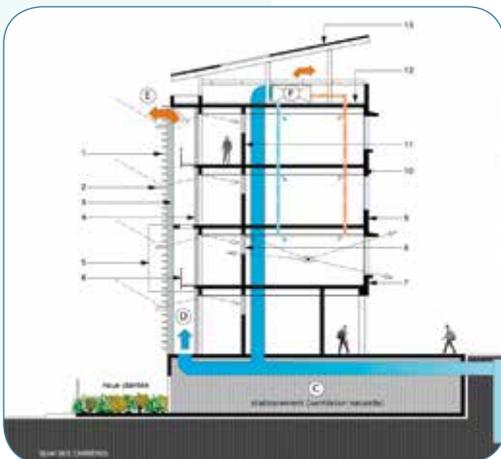
EPICURIA et MALISAN : architectes, Sophie Brindel-Beth : architecte et conseil environnemental

Problématique

Proposer une protection solaire efficace d'une façade sud en double peau donnant sur les circulations du lycée.

Solution envisagée - Mise en œuvre

Mise en œuvre de brise-soleil en terre cuite et de tablettes à lumière en béton blanc qui soulignent les nez de dalle. Cette circulation sud permet d'offrir un second jour aux salles de classe nord.



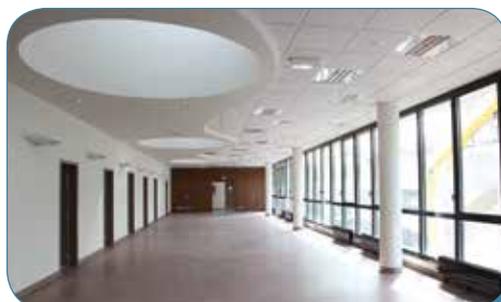
Coupe de principe © Epicuria et Malisan

Résultats, limites du système, fonctionnement en ciel clair et en ciel couvert

Cette vue par ciel clair montre des taches solaires dans la circulation. Parfaitement adapté à un espace de circulation, puisqu'il permet de récupérer des apports solaires en hiver et de s'en protéger en période chaude, ce système aurait nécessité dans une salle de classe d'un complément de protection par un complément de vitrage mobile.



Double peau de la façade sud équipé de Brise-soleil en terre cuite et tablettes à lumière sur l'espace de circulation © Région Île-de-France, Unité Lycées



Circulation et puits de lumière © Région Île-de-France, Unité Lycées

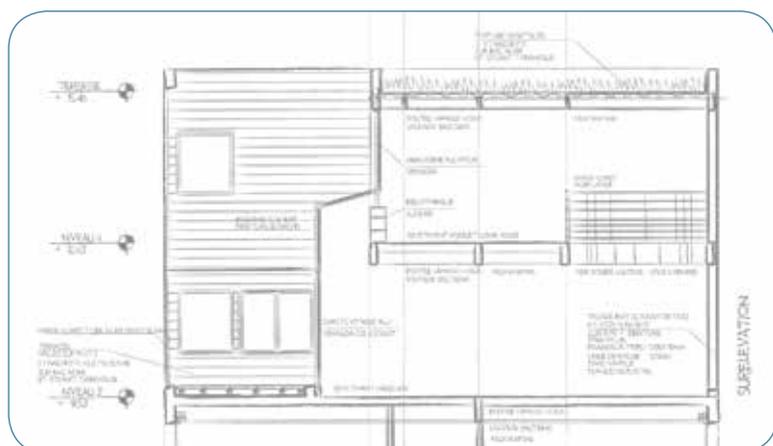
Surélévation d'un immeuble de logement – Issy les Moulineaux

Ivan FOUQUET : architecte

Problématique

À l'origine du projet, le client avait une demande forte d'espace ouvert et lumineux.

Solution envisagée - Mise en œuvre



Coupe transversale © Ivan Fouquet

Le projet crée des jeux de double hauteur. Une verrière inspirée des ateliers d'artiste donne la verticalité de l'espace et baigne celui-ci dans la lumière naturelle. Le volume forme un monolithe blanc permettant de maximiser les apports solaires, de favoriser les ombres et les reflets, le rayonnement de l'ensemble.



© Olivier Barrière



© Olivier Barrière

Résultats, limites du système, fonctionnement en ciel clair et en ciel couvert

Cet espace présente, à la demande du client, une surabondance de lumière accentuée par les couleurs claires et réfléchissantes choisies. Il présente des risques d'éblouissement et de surchauffes les jours de ciel clair. Néanmoins, la verrière est dotée de grands ouvrants et est orientée au nord.

Salle de réunion en sous-sol – Paris III^e

Bureaux de Le Sommer Environnement, architecte : Sylvain Dubuisson Architectes

Problématique

Lors de la réhabilitation de ce local, l'idée était d'apporter un maximum de lumière naturelle dans ce sous-sol qui bénéficiait d'un apport de lumière naturelle limité par un soupirail donnant sur la rue.

Avant les travaux

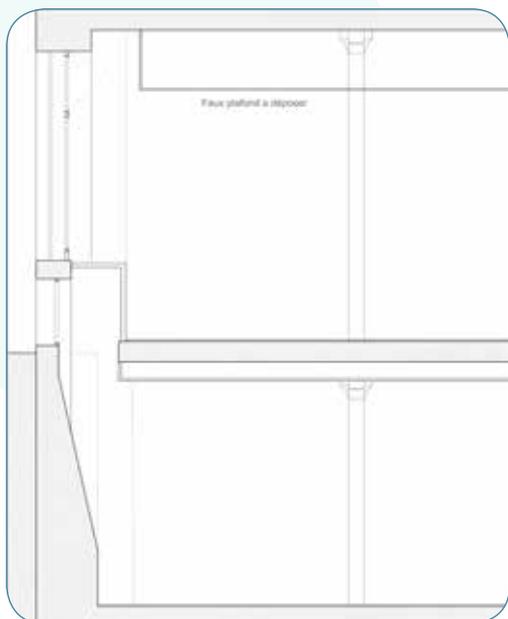
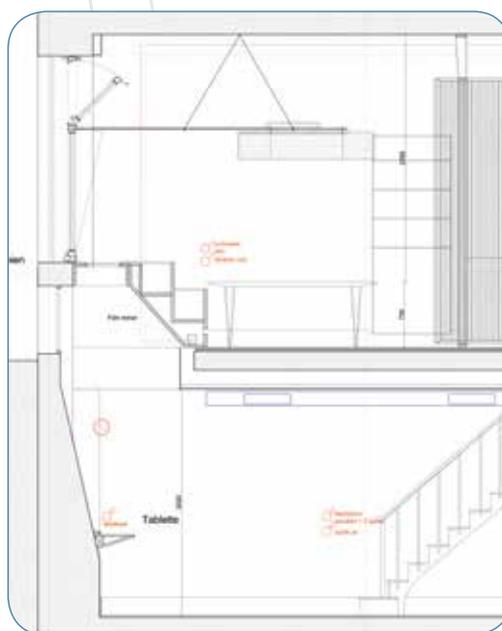


Photo et coupe : © Sylvain Dubuisson Architectes

Solution envisagée - Mise en œuvre

Pour améliorer la pénétration de la lumière naturelle, plusieurs moyens ont été mis en œuvre :

- création d'une ouverture horizontale pour bénéficier de l'apport de lumière naturelle du local au rez-de-chaussée,
- réduction de la surface au sol du RdC et création d'un biseau face au soupirail pour augmenter le flux de lumière naturelle entrant,
- la surface du biseau est recouverte d'un film miroir pour optimiser les réflexions lumineuses,
- la peinture des parois est claire pour également favoriser les réflexions lumineuses.



Coupe : © Sylvain Dubuisson Architectes

Photo : © Yannick Sutter

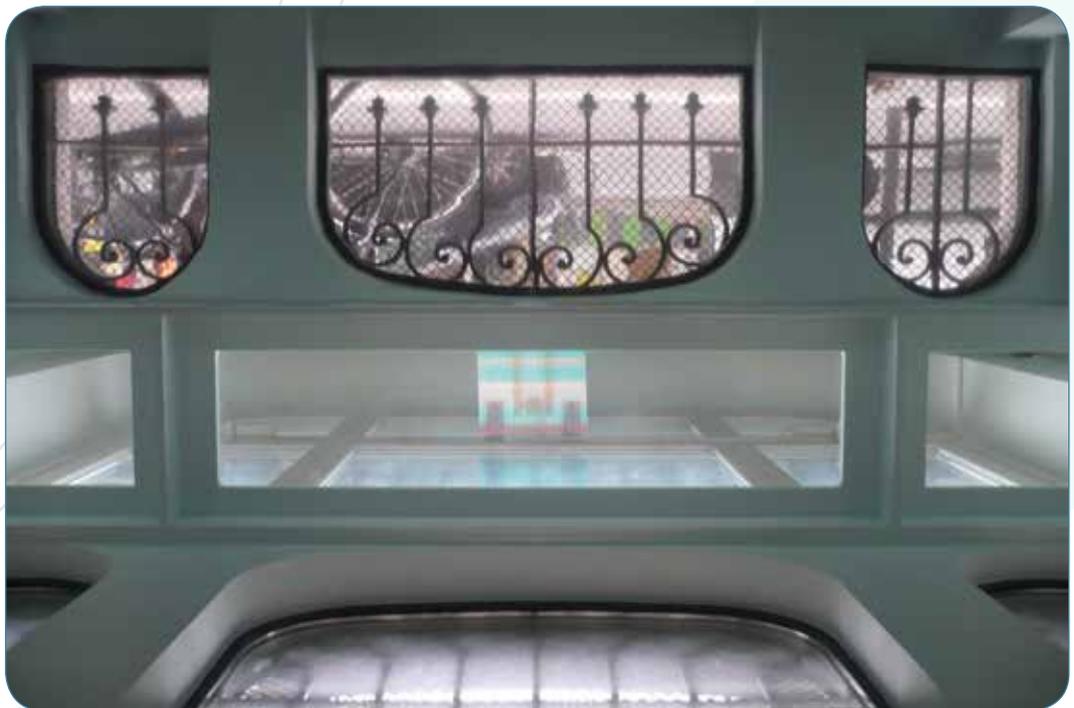


Résultats, limites du système, fonctionnement en ciel clair et en ciel couvert

Le système permet d'améliorer de manière notable les performances par rapport à l'existant. Même s'il ne permet pas d'offrir au local une autonomie en éclairage naturel, cette solution apporte un contact avec la lumière naturelle appréciable et parfois même du rayonnement solaire direct.



© Yannick Sutter



© Yannick Sutter

Bibliographie

- > ADEME, 2007, *Bureaux, écoles, mieux s'éclairer à coûts maîtrisés*, ADEME, Syndicat de l'Éclairage, 2007
- > ADEME, 2003, *Fiche « Mise en place de protections solaires fixes ou mobiles sur les façades exposées »*, ADEME, 2003
- > AFE, 1997, *Éclairage et travail sur écran de visualisation. 2^{ème} édition*. Société d'éditions LUX, 1997, 50p
- > AFE, 1983, *La lumière du jour dans les espaces intérieurs*, Société d'éditions LUX, 1983
- > Chauvel, 1993, *Evaluation de l'éblouissement dû aux fenêtres, état de la question, 1^{ère} partie*. Chauvel P., Collins J. B., Dogniaux R. LUX, 1983, n°121.
- > CIBSE, 1994, *Code for interior lighting*. CIBSE, London. 1994
- > CIBSE, 1996, *The visual environment for display screen use*. CIBSE, London, 1994.
- > CSTB, 2011, *Construire avec la lumière naturelle*, Fontoyont, M. Perreaudau M., Avouac P. CSTB Editions, 2011.
- > GREENLIGHT, 2002, *Programme Européen Greenlight*, Commission Européenne, 2002
- > INRS, 2000, *Éclairage des locaux de travail – Aide-mémoire juridique*. INRS, 2000, 18p
- > Kahn, 1996, *Silence et Lumière*, Kahn L. Editions du Linteau, 1996
- > Littlefair, 2002, *Site layout planning for daylight and sunlight: a guide to good practice*. Littlefair P.J. BRE Press, 2002
- > Littlefair, 1986, *Estimating daylight in buildings: Part 2*. Littlefair P.J. BRE Digest 310, 1986.
- > Lucuik, 2005, *A Business Case for Green Buildings in Canada*, Lucuik M, Canada Green Building Council, 2005
- > Mudri, 2000, *Comfortable and/or pleasant ambiance: conflicting issues?* Mudri L., Lénard J.D., PLEA2000 (Passive and Low-Energy Architecture), 2000, Cambridge, GB.
- > Mudri, 2001, *Dimensions of personality in the responses to luminous ambiences*, Mudri L., Legendre A., Pierson A., PLEA 2001, 2000, Florianópolis, Brazil.
- > Moniteur, 2007, *Traité de construction durable*. Bernstein D., Champetier JP., Hamayon L., Mudri L., Traisnel JP., Vidal T. Editions, Le Moniteur, 2007.
- > Perez, 1993, *All weather model for sky luminance distribution – preliminary configuration and validation*. Perez R, Seals R, Michalsky J., Solar Energy, 1993, 50 (3) pp. 235-245
- > Rea, 1993, *Lighting handbook, reference & application. 8th edition*. New York City: Illuminating Engineering Society of North America, 1993, 989p.
- > Reinhart, 2001, *Daylight availability and manual lighting control in office buildings – Simulation studies and analysis of measurement*. Reinhart C. Freiburg, Germany Fraunhofer Institute, 2001, 129p.
- > Reinhart, 2006, *Tutorial on the use of DAYSIM simulations for sustainable design*, Reinhart, C. National Research Council of Canada, 2006.
- > Sutter, 2006, *The use of shading systems in VDU office task office: a pilot study*. Sutter Y., Fontoyont M., Dumortier D. Energy & Building, 2006, 38, pp. 780- 789.
- > Wienold, 2009, *Daylight glare in offices*, Wienold J. Freiburg, Germany: Fraunhofer Institute, 2009, 136p.
- > Wikipedia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire

ARENE Île-de-France

Expert et référent de la Région francilienne pour le développement durable, l'Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies (ARENE) accompagne les collectivités locales et les acteurs régionaux dans leurs démarches. En associant expertises, réseaux et outils, elle fait le lien entre l'analyse et la mise en œuvre de solutions concrètes.

ICEB

L'Institut pour la conception écoresponsable du bâti (ICEB), est une association regroupant aujourd'hui une soixantaine de professionnels de l'architecture, du bâtiment, de l'urbanisme, de la santé et de l'environnement qui, au quotidien, déploient sur le terrain leur expertise de la construction et de l'aménagement durables et responsables, au service de l'utilisateur et de son environnement.

LES GUIDES BIO-TECH

- Ventilation naturelle et mécanique •
- L'énergie grise des matériaux et des ouvrages •
- L'éclairage naturel •



39, boulevard Beaumarchais - 75003 PARIS
Tél. : 01 77 45 36 50 - Fax : 01 40 29 43 85
www.asso-iceb.org



94 bis, avenue de Suffren - 75015 Paris
Tél. : 01 82 52 88 00 - Fax : 01 40 65 90 41
www.arenidf.org