



LE RÔLE DE L'ÉCLAIRAGE DANS LE DESIGN ARCHITECTURAL

Par Erika Baffico

LIVRE BLANC

modulyss®

LIVRE BLANC

INDEX

L'IMPORTANCE DE L'ÉCLAIRAGE DANS L'ARCHITECTURE ET LE DESIGN D'INTÉRIEUR	4
L'AVÈNEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ ET LA PERTE D'OBSCURITÉ	4
LA VARIABILITÉ DE LA LUMIÈRE NATURELLE DANS L'ESPACE ET LE TEMPS	5
L'ARCHITECTURE EN TANT QU'INTERPRÉTATION DES SPÉCIFICITÉS DE LA LUMIÈRE NATURELLE LOCALE	6
LES PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA LUMIÈRE ET DU RYTHME CIRCADIEN	7
LA PHYSIQUE DE LA LUMIÈRE	7
LE SYSTÈME VISUEL HUMAIN	9
LES EFFETS INVISIBLES DE LA LUMIÈRE ET DU RYTHME CIRCADIEN : CONCEVOIR POUR LE BIEN-ÊTRE	10
L'IMPACT DES MATÉRIAUX SUR LA RÉFLEXION ET L'ABSORPTION DE LA LUMIÈRE, ET RELATION AVEC LA PERCEPTION HUMAINE	12
LA PHYSIQUE DE LA LUMIÈRE RÉÉMISE	12
PERCEPTION ET VISION	14
REPOUSSER LES FRONTIÈRES PERCEPTUELLES DE L'ESPACE GRÂCE À L'ÉCLAIRAGE	15
INNOVATION TECHNOLOGIQUE ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES SOLUTIONS D'ÉCLAIRAGE	19
STRATÉGIES D'ÉCLAIRAGE ÉCOÉNERGÉTIQUES ET DÉVELOPPEMENT DURABLE	19
SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE INTELLIGENTS : IDO, INTÉGRATION DE L'IA ET TÉLÉCOMMANDES	20
CERTIFICATIONS ET NORMES D'ÉCLAIRAGE DURABLE	21
ANTICIPER LES BESOINS FUTURS EN ÉCLAIRAGE DES ESPACES EN ÉVOLUTION	23
INTÉGRATION DE L'ÉCLAIRAGE AUX MATÉRIAUX	23
IMPACT DE LA LUMIÈRE SUR LE REVÊTEMENT DE SOL	24
TENDANCES ACTUELLES DE L'ÉCLAIRAGE ARCHITECTURAL ET D'INTÉRIEUR	25
CONCLUSION ET RÉFLEXIONS FUTURES SUR L'ÉCLAIRAGE DANS LE DESIGN	26
SUGGESTIONS DE LECTURE	27
SOURCE DES CITATIONS	27

Du concept de surface comme outil solide pour marquer une frontière, une limite, pour sceller un espace, on peut passer à l'idée de surface en tant que référentiel de lumière, en tant qu'instrument lumineux pour agrandir l'espace, l'ouvrir, non pour le définir, mais pour permettre au regard de transcender ses frontières, ses limites.

La lumière, les lumières colorées, manquent de solidité ; elles possèdent une présence évanescence, incertaine, mobile et intouchable. La conception d'espaces incertains et mouvants — psychologiquement et culturellement traversables — répond peut-être à de nouveaux besoins existentiels.

— Ettore Sottsass, in Abet Laminati e Ettore Sottsass, 40 anni di lavoro insieme, Palazzo della Triennale di Milano (2005)

Ce qui m'intéresse, c'est la possibilité de créer de l'espace avec de la lumière encore plus qu'avec n'importe quel autre matériau. Je suis fasciné par la façon dont l'espace prend forme en fonction de l'endroit où la lumière tombe et par la relation entre nous et cette formation.

— James Turrell

L'IMPORTANCE DE L'ÉCLAIRAGE DANS L'ARCHITECTURE ET LE DESIGN D'INTÉRIEUR

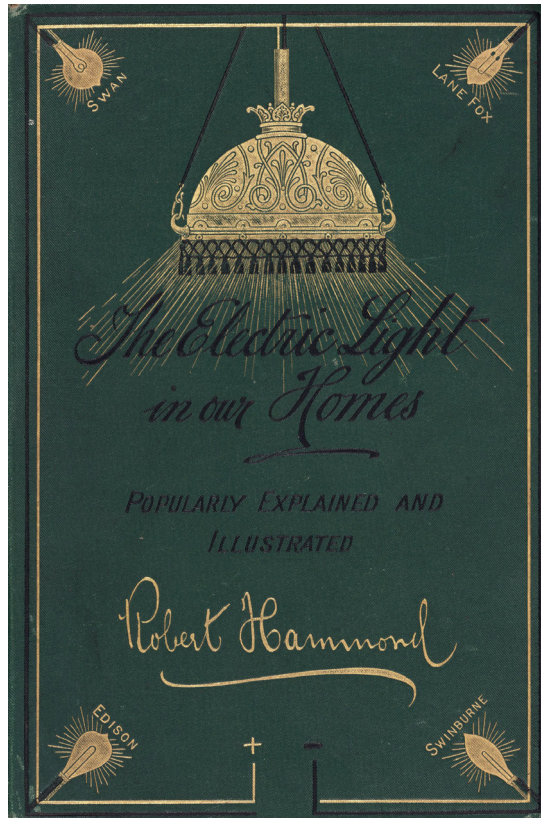
L'AVÈNEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ ET LA PERTE D'OBSCURITÉ

Pendant des siècles, les humains ont vécu en fonction du cycle du soleil, de l'aube au crépuscule, en recourant à la lune, au feu et plus tard à la lumière des bougies pour s'éclairer pendant la nuit. L'invention de l'ampoule électrique à la fin du 19^e siècle a marqué un changement révolutionnaire, permettant à des activités très ciblées de se dérouler la nuit et dans des lieux isolés. La lumière artificielle est alors devenue indispensable pour s'adapter au nouveau mode de vie apparu à la suite de la révolution industrielle et de la densification croissante de la population urbaine. .

En un peu plus d'un siècle, l'humanité s'est entièrement émancipée des contraintes de la lumière naturelle. Dans le design d'intérieur, l'amélioration de l'efficacité énergétique des sources lumineuses a de plus en plus permis de remplacer la lumière naturelle par un éclairage artificiel. Les cycles veille-sommeil traditionnels ont été perturbés, le temps artificiel a remplacé le temps naturel et de nouvelles utilisations des espaces et possibilités architecturales ont émergé. Une couverture continue dans des domaines professionnels tels que la santé est devenue possible, permettant des opérations 24 heures sur 24. Par ailleurs, la lumière artificielle a ouvert la voie pour explorer des environnements isolés, allant des activités souterraines et sous-marines à l'exploration spatiale.

Aujourd'hui, une personne passe en moyenne 90 % de sa vie à l'intérieur, exposée à des quantités importantes de lumière artificielle. Cependant, comme cela arrive souvent, la capacité d'adaptation de l'humain aux changements d'époque survenant sur une courte période est limitée. La recherche scientifique a démontré que le confinement prolongé dans des environnements dotés d'une lumière naturelle insuffisante a un impact profondément négatif sur le bien-être, à la fois psychologique et physiologique. La privation de lumière naturelle provoque des effets nocifs, comme des troubles du sommeil, de l'anxiété, des problèmes de santé mentale, de la dépression, des maux de tête, de la fatigue et un isolement social. Les problèmes liés au stress et causés par des périodes prolongées à l'intérieur sont répandus dans le monde entier, en particulier dans les zones urbaines densément peuplées. .

La conception d'éclairage de qualité est dès lors essentielle à la création d'environnements qui favorisent le bien-être et le confort.

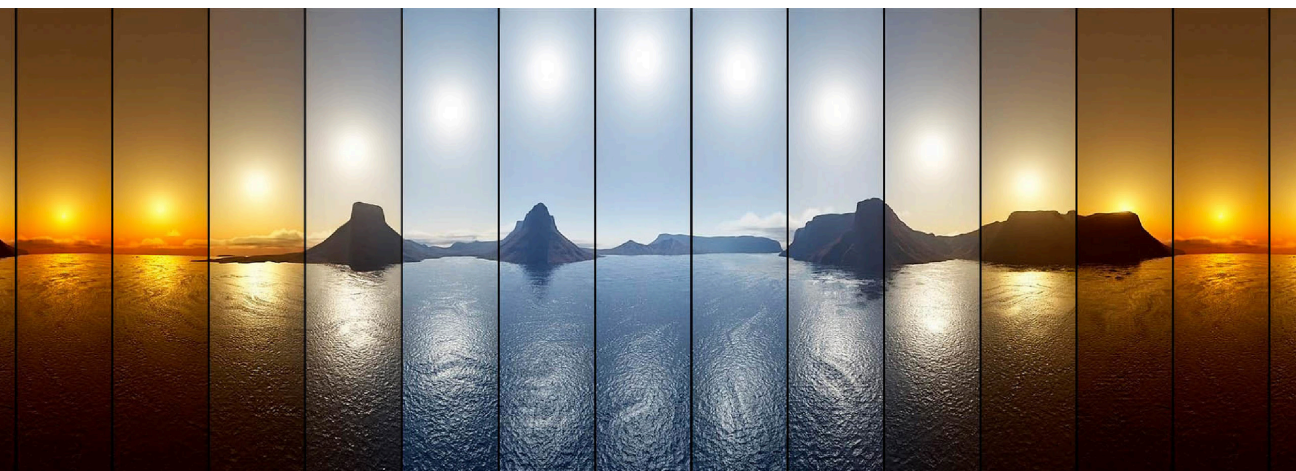
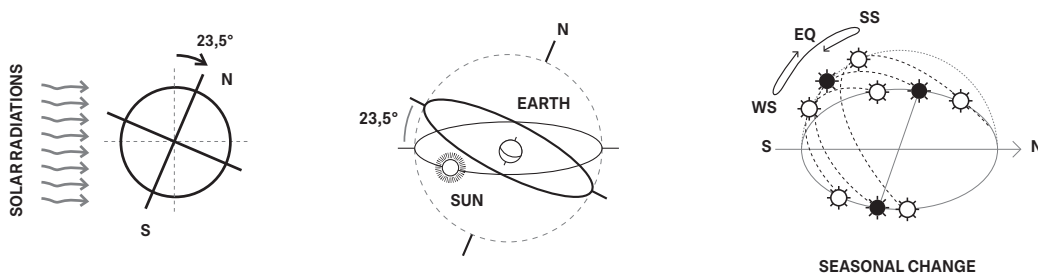


LA VARIABILITÉ DE LA LUMIÈRE NATURELLE DANS L'ESPACE ET LE TEMPS

Le charme de la lumière naturelle réside dans sa variabilité constante : elle change d'intensité et de couleur tout au long de la journée, de l'aube au crépuscule, de jour en jour, de saison en saison et d'un lieu à l'autre. D'un point de vue scientifique, la composition et l'intensité de la lumière naturelle — partie du spectre électromagnétique visible émise par le soleil et atteignant la Terre — changent remarquablement en fonction des variables suivantes :

- **Jour** : Un jour est défini par la rotation de la Terre sur son axe par rapport à la position du soleil (24 heures).
- **Saisons** : Les saisons sont influencées par l'inclinaison axiale de la Terre jusqu'à 23 degrés et 27 minutes par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). En raison de cette inclinaison, l'hémisphère Nord reçoit un maximum de rayonnement solaire au solstice d'été (21 juin) et un minimum de rayonnement au solstice d'hiver (21 décembre). Ce schéma s'inverse dans l'hémisphère sud, où l'hiver coïncide avec l'été dans le nord, et le printemps coïncide avec l'automne. Les équinoxes (20 mars et 22 septembre) représentent des états de transition où la lumière du soleil frappe perpendiculairement la Terre.
- **Latitude** : Les conditions de rayonnement solaire changent à mesure que l'on se déplace de l'équateur vers les pôles. Près de l'équateur, les conditions restent relativement constantes toute l'année. Aux pôles, on observe des extrêmes avec une nuit perpétuelle en hiver et un soleil qui ne se couche jamais en été.
- **Déclinaison** : Le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest, en suivant une trajectoire vers le sud dans l'hémisphère nord et vers le nord dans l'hémisphère sud. La déclinaison solaire détermine l'altitude du soleil le long de cette trajectoire, qui varie avec les saisons : elle est plus basse en hiver et plus élevée en été.
- **Atmosphère** : L'atmosphère affecte la transmission de la lumière solaire et modifie sa distribution spectrale et sa couleur. Ces modifications dépendent de la composition atmosphérique, telle que la présence de nuages, de brouillard ou de neige, et sont influencées par des paramètres locaux, tels que la température, l'humidité et la pression de l'air.

En général, l'intensité de la lumière naturelle varie de maximum 100 000 lux sous la lumière directe du soleil d'été à midi à 10 000 lux les jours couverts, et atteint son minimum de 0,25 lux sous le clair de lune.



L'ARCHITECTURE EN TANT QU'INTERPRÉTATION DES SPÉCIFICITÉS DE LA LUMIÈRE NATURELLE LOCALE

La lumière est un élément de design unique, capable de créer des effets sublimes et impressionnants tout en étant une ressource objectivement mesurable et contrôlable, comme n'importe quel autre matériau en architecture.

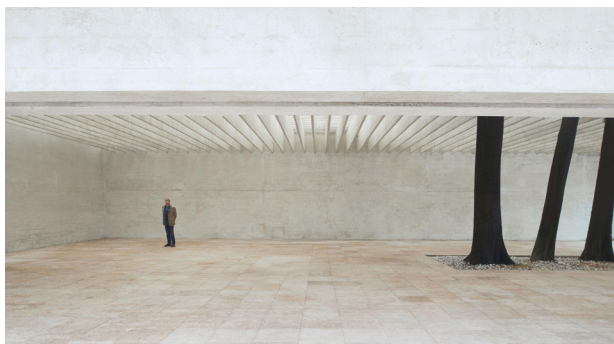
Tout au long de l'histoire, l'architecture traditionnelle a évolué pour maximiser l'apport de la lumière directe du soleil pendant les mois d'hiver et protéger les intérieurs de ces mêmes rayons pendant l'été. En adhérant à ce principe d'optimisation bioclimatique, l'architecture a développé des traits distinctifs adaptés à chaque région géographique. Un exemple direct est la dimension des fenêtres dans les bâtiments, dont la taille des ouvertures augmente avec la latitude. La lumière naturelle définit donc non seulement l'identité géographique d'un lieu, mais aussi son essence culturelle.

Voici trois exemples emblématiques de l'architecture européenne — représentative de contextes divers — qui interprètent magistralement les spécificités de la lumière naturelle :



Dans le contexte méditerranéen, **Carlo Scarpa** a utilisé une lumière dynamique et de forts contrastes pour créer des décors dramatiques pour les œuvres exposées dans l'extension de la Gipsoteca di Canova, à Possagno.

En Europe du Nord, **Alvar Aalto** a utilisé une lumière douce, uniforme et diffuse pour créer une atmosphère sereine dans la bibliothèque de Viipuri.



Enfin, dans un défi de design audacieux, **Sverre Fehn** a recréé la qualité distinctive de la lumière nordique dans un cadre méditerranéen avec le pavillon nordique de la Biennale de Venise en 1958.

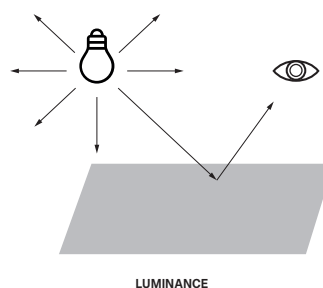
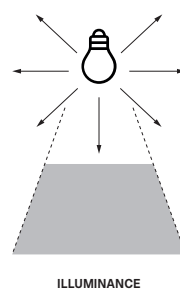
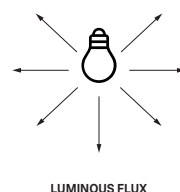
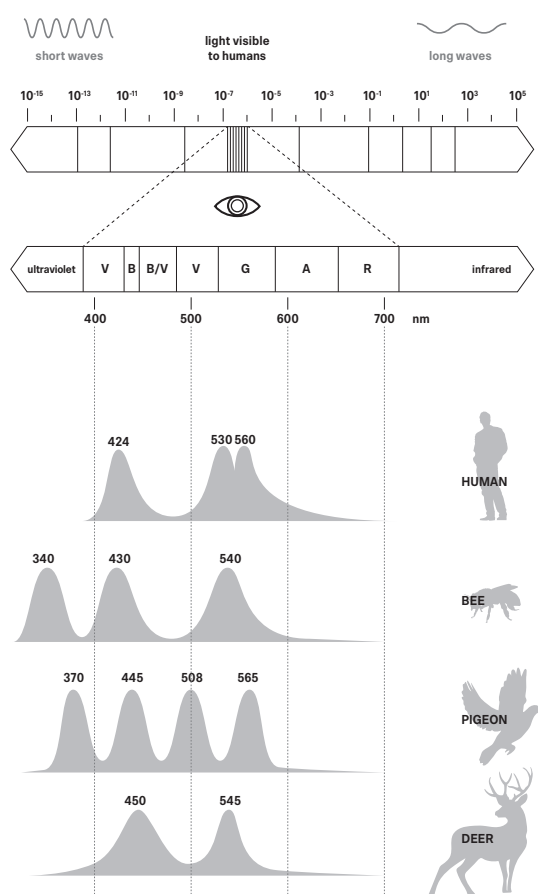
Ces exemples illustrent comment l'interprétation réfléchie de la lumière naturelle peut se transformer en caractéristique déterminante de l'identité architecturale, enracinée dans des contextes environnementaux et culturels locaux.

LES PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA LUMIÈRE ET DU RYTHME CIRCADIEN

LA PHYSIQUE DE LA LUMIÈRE

La lumière est la gamme de rayonnement électromagnétique visible par l'œil humain, avec des longueurs d'onde comprises entre 380 nanomètres (ondes courtes) et 760 nanomètres (ondes longues). Chaque longueur d'onde correspond à une couleur spécifique du spectre électromagnétique : le violet autour de 380 nm, suivi du bleu, du vert, d'un pic de jaune proche de 550 nm, de l'orange, et enfin du rouge autour de 700 nm. La combinaison de toutes ces longueurs d'onde forme une synthèse additive perçue en tant que lumière blanche.

Le rayonnement visible n'est qu'une petite partie du spectre électromagnétique émis par le soleil. D'autres êtres vivants sont capables de percevoir des longueurs d'onde invisibles pour l'être humain, telles que l'ultraviolet et l'infrarouge. Par exemple, les abeilles voient toutes les couleurs, sauf le rouge, avec des pics dans les fréquences bleues et ultraviolettes. Les pigeons sont capables de distinguer des millions de nuances de couleurs, car leur rétine contient un nombre plus élevé de photorécepteurs (cônes). Comme de nombreux herbivores, les cerfs ne perçoivent pas le rouge et leur vision culmine dans les fréquences bleues et jaunes en créant diverses nuances de vert et de gris.



Toute la lumière blanche n'est pas perçue de manière identique, car sa composition affecte également sa tonalité. La **température de la couleur**, mesurée en Kelvin (K), représente la température d'un corps noir idéal lorsqu'il émet un rayonnement spécifique, et donc une couleur particulière :

- **Lumière chaude** : inférieure à 3 300 K
- **Lumière neutre** : entre 3 300 K et 5 300 K
- **Lumière froide** : supérieure à 5 300 K

Exemples :

- Lumière des bougies : environ 1 000 K
- Soleil de midi : environ 4 900 K
- Ciel couvert : environ 7 000 K

Le rendu des couleurs fait référence à la capacité d'une source lumineuse à reproduire les couleurs aussi fidèlement que possible par rapport à la lumière naturelle du jour. Il est exprimé par l'ICR (indice de rendu des couleurs) ou la valeur Ra, qui varie de 50 à 100 :

- Excellent : Ra supérieur à 90
- Bon : Ra entre 80 et 90
- Modéré : Ra entre 60 et 80
- Médiocre : Ra inférieur à 60

Le flux lumineux représente la quantité totale d'énergie lumineuse émise par une source par unité de temps et se mesure en lumens (lm).

L'éclairement désigne le flux lumineux incident sur une surface. Son intensité diminue proportionnellement au carré de la distance et se mesure en lux (lx).

La luminance mesure la lumière réfléchie par une surface et dépend de la couleur et de la nature de la surface. L'éclairage ambiant peut être contrôlé en combinant la lumière réfléchie avec des surfaces de couleur claire (plus de réflexion) ou foncée (moins de réflexion). Elle se mesure en candelas (cd), qui représentent le rapport entre l'intensité lumineuse dans une direction spécifique et la taille de la surface émettrice.

Exemples :

- Lumière directe du soleil : environ 32 000 à 100 000 lx
- Éclairage de bureau conforme aux normes UNI EN 12464 : 500 lx
- Réflexion de la pleine lune : environ 1 lx

Applications :

- Tâches de précision (par exemple, dessin, contrôle qualité) : 500–1 000 lux
- Tâches courantes (par exemple, lecture, travail sur écran) : 300–500 lux
- Activités générales (par exemple, orientation, circulation) : moins de 100 lux

LE SYSTÈME VISUEL HUMAIN

La rétine de l'œil contient plus d'un million de terminaisons nerveuses photosensibles, appelées photorécepteurs, qui convertissent les signaux lumineux en signaux bioélectriques. Ces signaux sont transmis via le nerf optique au cerveau, où ils sont transformés en sensations visuelles. Il existe trois types de photorécepteurs : les cônes, les bâtonnets et les cellules ganglionnaires.

Les cônes sont responsables de la vision diurne, ou photopique. Très sensibles aux couleurs et moins sensibles aux faibles intensités lumineuses, ils sont principalement présents dans la zone centrale de la rétine. Il existe trois types de cônes, chacun réglé sur une longueur d'onde de crête spécifique de la lumière : rouge (600 nm), vert (550 nm) et bleu (350 nm). La perception de la lumière incolore résulte de la stimulation équilibrée des trois types de cônes, tandis que les sensations chromatiques résultent de la stimulation d'un ou de plusieurs types particuliers.

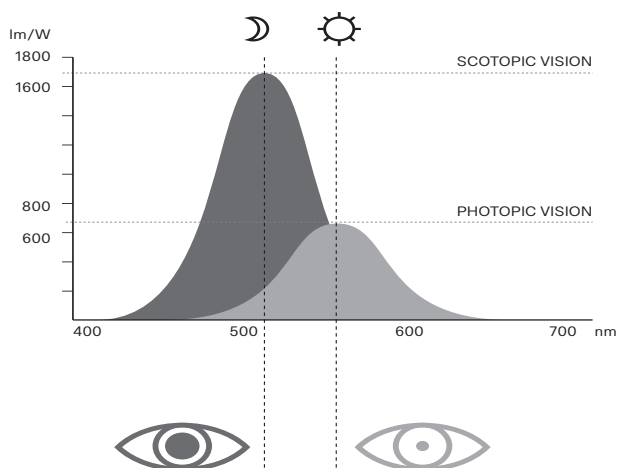
Exemples :

- Cônes bleu + vert : perception du cyan
- Cônes vert + rouge : perception du jaune
- Cônes bleu + rouge : perception du magenta
- Cônes bleu + vert + rouge : perception du blanc

Les bâtonnets permettent la vision nocturne, ou scotopique. Ils sont extrêmement sensibles aux faibles niveaux de lumière, même inférieurs à 1 lux, et sont principalement répartis en périphérie de la rétine. Les bâtonnets sont capables de détecter les variations de niveaux de lumière et de mouvements, mais de manière achromatique.

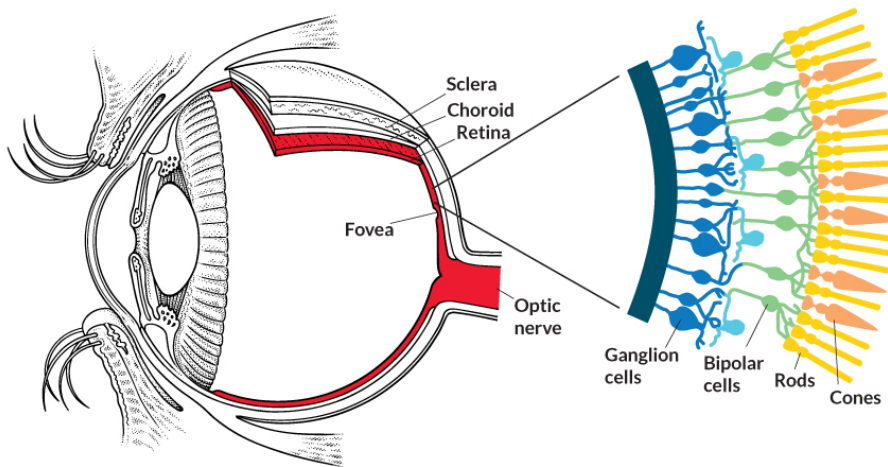
Les bâtonnets sont plus sensibles aux longueurs d'onde plus courtes que celles perçues par les cônes. La couleur de surface affecte également cette sensibilité ; par exemple, entre deux surfaces de couleurs différentes éclairées à l'identique, celle plus proche de 550 nm paraîtra plus lumineuse. Cela explique pourquoi les objets rouges, comme les pommes ou les coquelicots, sont les premiers à s'assombrir à la lumière du soir, tandis que l'herbe verte reste visible plus longtemps.

Le système perceptif humain possède une grande capacité d'adaptation. L'œil s'adapte à des niveaux de lumière variables grâce à la régulation mécanique de la pupille et à l'activation des photorécepteurs. Par exemple, lorsque vous entrez dans un tunnel sombre en conduisant, l'œil met quelques secondes à s'adapter, tout comme il le fait à la sortie en plein soleil. L'adaptation est plus rapide lors de la transition d'un niveau de lumière faible à un niveau élevé, car l'action mécanique de la pupille est plus rapide que la réaction des photorécepteurs, bien que les deux soient très efficaces.



LES EFFETS INVISIBLES DE LA LUMIÈRE ET DU RYTHME CIRCADIEN : CONCEVOIR POUR LE BIEN-ÊTRE

Le troisième groupe de photorécepteurs se compose de cellules ganglionnaires rétiniennes, également appelées **IpRGC (cellules ganglionnaires rétiniennes intrinsèquement photosensibles)**. Ces cellules ne sont pas impliquées dans la formation de l'image, mais sont responsables de la synchronisation du **rythme circadien** (du latin circa diem, signifiant « environ une journée »). Elles transmettent les **signaux lumineux externes au noyau suprachiasmatique (NSC)**, qui régule un processus endogène de l'organisme appelé « entraînement » par la libération d'hormones, dont la mélatonine. Lorsque l'obscurité tombe, les niveaux de mélatonine augmentent naturellement, tandis que l'exposition à la lumière inhibe sa libération. **Les courtes longueurs d'onde** (communément appelées lumière bleue, 460–480 nm) ont le plus grand impact sur la sensibilité des cellules ganglionnaires, en inhibant la production de mélatonine. C'est pourquoi l'utilisation d'écrans avant le coucher est fortement déconseillée.

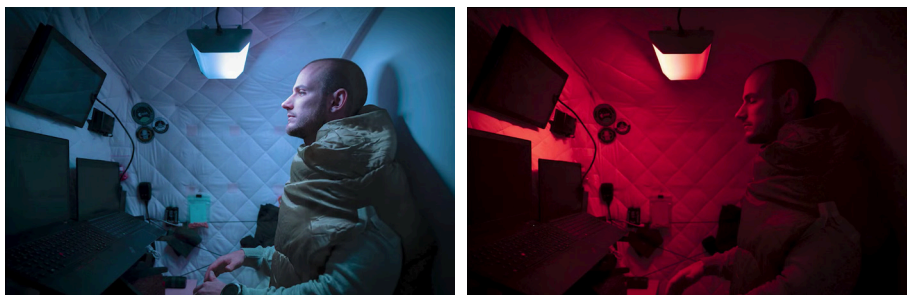


Les cellules ganglionnaires régulent un large éventail de fonctions vitales, notamment le cycle veille-sommeil, la température corporelle, la fréquence cardiaque, la digestion, la vigilance, l'humeur et l'efficacité au travail. Fait remarquable, ces cellules restent fonctionnelles même chez les personnes malvoyantes.

La vie sur Terre a toujours été régie par le cycle de la lumière naturelle, et presque tous les organismes présentent des rythmes biologiques alignés sur la période de rotation de la Terre, qui est d'environ 24 heures. Cependant, l'exposition humaine à la lumière artificielle est un phénomène relativement nouveau en termes d'évolution. La lumière permet non seulement la vision, mais déclenche également des **effets non visibles** importants sur le bien-être psychologique et physiologique.

Cette compréhension a donné naissance à des concepts tels que **l'éclairage centré sur l'humain, l'efficacité circadienne (ACV), l'efficacité mélanopique (EML) et la lumière biodynamique**. L'objectif est de concevoir un éclairage artificiel qui non seulement améliore la visibilité de l'environnement, mais qui reproduit aussi la qualité de la lumière naturelle dans le but d'améliorer la qualité de vie (éclairage centré sur l'humain). Cette approche contribue au bien-être humain en favorisant de meilleures relations, une productivité accrue et une plus grande satisfaction personnelle.

Parmi les exemples de projets pionniers dans ce domaine, nous pouvons citer le projet d'éclairage circadien de Saga Space Architects. Conçu pour les astronautes dans l'espace, il est doté d'un dispositif d'éclairage qui simule les changements de lumière naturelle, y compris les variations météorologiques, et a été installé sur la **Station spatiale internationale** en 2023



Autre innovation remarquable, le **système CoeLux** est un produit d'éclairage avancé qui imite de manière convaincante la lumière directe du soleil à l'aide d'une configuration optique sophistiquée.

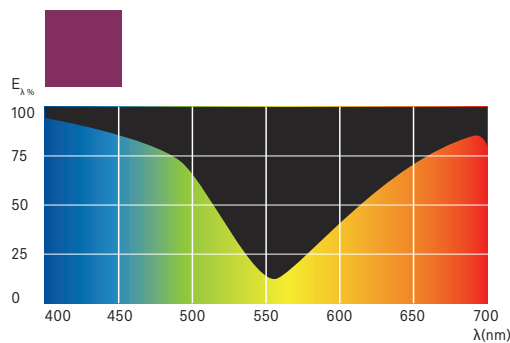


L'IMPACT DES MATÉRIAUX SUR LA RÉFLEXION ET L'ABSORPTION DE LA LUMIÈRE, ET RELATION AVEC LA PERCEPTION HUMAINE

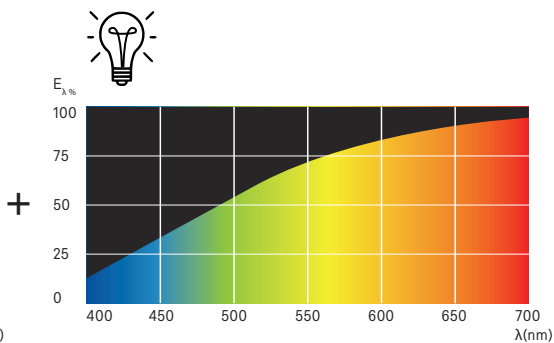
LA PHYSIQUE DE LA LUMIÈRE RÉÉMISE

Le paradoxe perceptuel de la lumière réside dans sa nécessité de se matérialiser pour être vue. Grâce à sa composition complexe, la lumière modifie également la perception des éléments avec lesquels elle interagit.

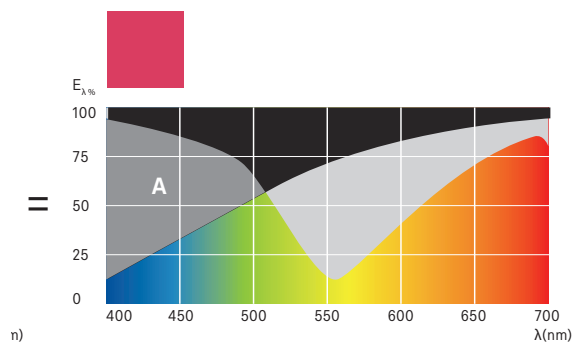
Lorsque la lumière frappe un objet, une partie de son énergie est absorbée tandis qu'une autre est réémise, en fonction des caractéristiques de la surface et de son spectre de réémission.



Spectrum of absolute re-emission of a purple color.



Emission spectrum of an incandescent (tungsten) bulb.



Re-emission spectrum of the purple color, related to the warm light received: the color can not re-emit the amount of energy "A", because it is not present in the emission spectrum.

En termes absolus, les surfaces **blanches** réémettent toute la lumière reçue, le **noir** l'absorbe entièrement et le **gris** en absorbe une partie. Cependant, en réalité, même les surfaces blanches, comme le papier, retiennent une partie de la lumière. Les couleurs sont composées de spectres de réémission spécifiques qui définissent la couleur que nous percevons. Sous une lumière blanche, ce processus est relativement simple et intuitif. Cependant, la perception d'un objet peut varier sous des sources lumineuses avec des spectres d'émission différents.

Les aliments présentés dans certains supermarchés équipés de systèmes d'éclairage avancés illustrent par exemple ce phénomène. La viande dans les comptoirs est souvent éclairée avec des longueurs d'onde spécifiques qui accentuent les tons rouges. À la maison, lorsqu'ils sont éclairés par des sources lumineuses plus froides, ces produits apparaissent différemment. Lorsqu'on les réexpose à la lumière du soleil, ils retrouvent partiellement leur coloration d'origine, car la lumière naturelle fournit le spectre le plus complet.

D'un point de vue scientifique, cela se produit parce que **chaque couleur possède un spectre de réémission absolu unique**. Lorsqu'on le combine au spectre d'émission spécifique de la source lumineuse, on obtient le spectre de **réémission relatif**. Le schéma ci-dessous illustre un scénario dans lequel une couleur ne peut pas réémettre la composante énergétique étiquetée « A », parce que cette composante est absente du spectre d'émission de la source lumineuse spécifique. En conséquence, la couleur perçue change.

Inversement, **deux couleurs différentes peuvent, malgré leurs compositions spectrales distinctes, apparaître identiques** dans des conditions d'éclairage spécifiques. Ce phénomène se nomme le **métamérisme** et se produit lorsque les barycentres de leurs spectres de réémission absolue s'alignent sur la même longueur d'onde dominante et produisent des sensations visuelles similaires. Ces couleurs, qui semblent identiques sous un type de lumière, peuvent être radicalement différentes sous un autre.

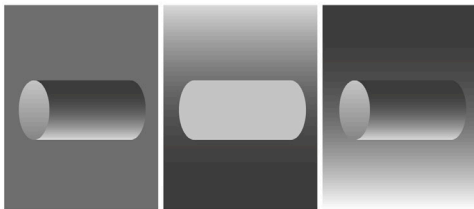
L'industrie moderne cherche activement à minimiser cet effet en développant des couleurs aux **propriétés spectrales stables**, en visant un spectre de réémission plat et cohérent dans différentes conditions d'éclairage.



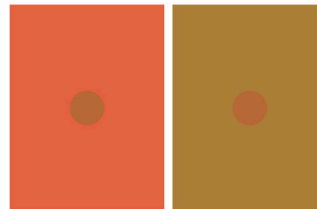
PERCEPTION ET VISION

La vision est un processus physique et biologique impliquant les yeux et le système visuel qui nous permet de détecter la lumière et les informations visuelles de l'environnement qui nous entoure. Ce processus nous permet de percevoir les caractéristiques physiques de l'environnement, telles que la couleur, la forme, la taille et la position des objets. Cependant, le cerveau interprète les informations reçues par l'œil et, souvent, la perception de l'espace ne correspond pas à l'espace réel.

La perception est un processus qui implique l'interprétation des informations visuelles dans le contexte plus large des expériences émotionnelles, culturelles et biologiques. Elle est étroitement liée aux stimuli et à leurs contrastes : la lumière est perçue par opposition à l'obscurité, une couleur est interprétée par rapport à sa complémentarité, et même des couleurs similaires peuvent apparaître différentes dans des conditions spécifiques. Chaque stimulus, sans contraste, perd sa capacité à être perçu.



Perception of three-dimensionality through chiaroscuro

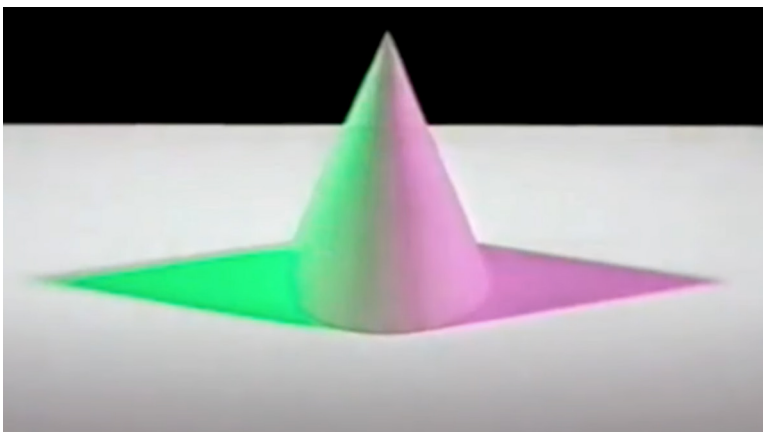


Simultaneous contrast

Ainsi, la vision n'est jamais un facteur objectif, mais plutôt une interprétation d'éléments contextualisés dans le champ visuel. Ce champ visuel ou perceptif peut être comparé au cadre d'un tableau ou à la fenêtre à travers laquelle on observe un paysage. Il est évolutif, comme une poupée russe : plus on se rapproche d'un objet, plus le champ visuel se rétrécit, et son interprétation change en conséquence.

Des exemples courants de perception comprennent l'utilisation du **clair-obscur** pour créer un sentiment illusoire de tridimensionnalité sur un objet bidimensionnel, et ce que l'on nomme le **contraste simultané**, où la même couleur apparaît différente en fonction du fond sur lequel elle est perçue.

En ce qui concerne la perception de la couleur, **Johann Wolfgang von Goethe** a mené une expérience très intéressante : un cône éclairé par deux sources de lumière blanche montre leurs ombres grises respectives. Ensuite, un filtre coloré est appliqué à la source lumineuse de gauche et la source lumineuse de droite est éteinte, ne laissant qu'une ombre grise. Lorsque la lumière blanche du côté droit est rallumée, le résultat est étonnant : notre cerveau interprète l'ombre du côté droit comme la couleur complémentaire du vert, même si, en réalité, elle reste une ombre grise.



REPOUSSER LES FRONTIÈRES PERCEPTUELLES DE L'ESPACE GRÂCE À L'ÉCLAIRAGE

Grâce aux variations d'intensité, de couleur et de saturation de la lumière dans un espace, l'œil humain perçoit des zones de lumière et d'ombre et attribue des formes et des dimensions à l'environnement. L'interaction entre les caractéristiques de l'éclairage et les finitions joue un rôle fondamental dans la conception spatiale. Voici quelques exemples importants qui explorent l'expansion des limites de la perception dans l'espace grâce à l'éclairage.

Le summum de la recherche perceptuelle, qui attribue un rôle fondamental à la lumière dans le processus visuel pour comprendre et expérimenter l'espace, atteint sa plus haute expression dans les œuvres de **James Turrell**. Pionnier dans la traduction de la nature tactile de la lumière en forme tangible, il est réputé pour utiliser l'effet Ganzfeld pour créer des espaces où l'observateur est incapable d'établir des repères et pour transformer des espaces confinés en paysages illimités. L'observateur est immergé dans un espace dépourvu de stimuli visuels et acoustiques et est incapable d'établir des points de repère en raison de la lumière homogène qui remplit les surfaces de l'environnement.



Un autre exemple notable est le travail de **Jorrit Tornquist**, consultant en couleurs et théoricien austro-italien qui, tout au long de sa carrière, a démontré comment l'utilisation stratégique de la couleur peut enrichir le design architectural et aider à créer des espaces fonctionnels et distinctifs

L'une de ses œuvres les plus représentatives est le design chromatique de l'usine de valorisation énergétique de déchets de Brescia, une installation ultramoderne conçue pour récupérer l'énergie des déchets urbains. Située à côté de l'autoroute Milan-Venise, son intégration dans le paysage nécessitait une attention particulière, car elle fait également office de vitrine pour l'entreprise et la ville. La tour de 120 mètres a été conçue avec une séquence de tons bleu-gris qui lui permettent de se fondre dans le ciel environnant en s'adaptant dynamiquement aux différentes conditions météorologiques. Les couleurs choisies tiennent compte de la luminosité prédominante, et même l'agencement des espaces verts avoisinants a été prévu pour créer des combinaisons de couleurs harmonieuses avec les bâtiments tout en s'adaptant aux changements saisonniers. Ce choix chromatique favorise l'intégration de la structure dans l'environnement et offre une expérience visuelle dynamique et en constante évolution.

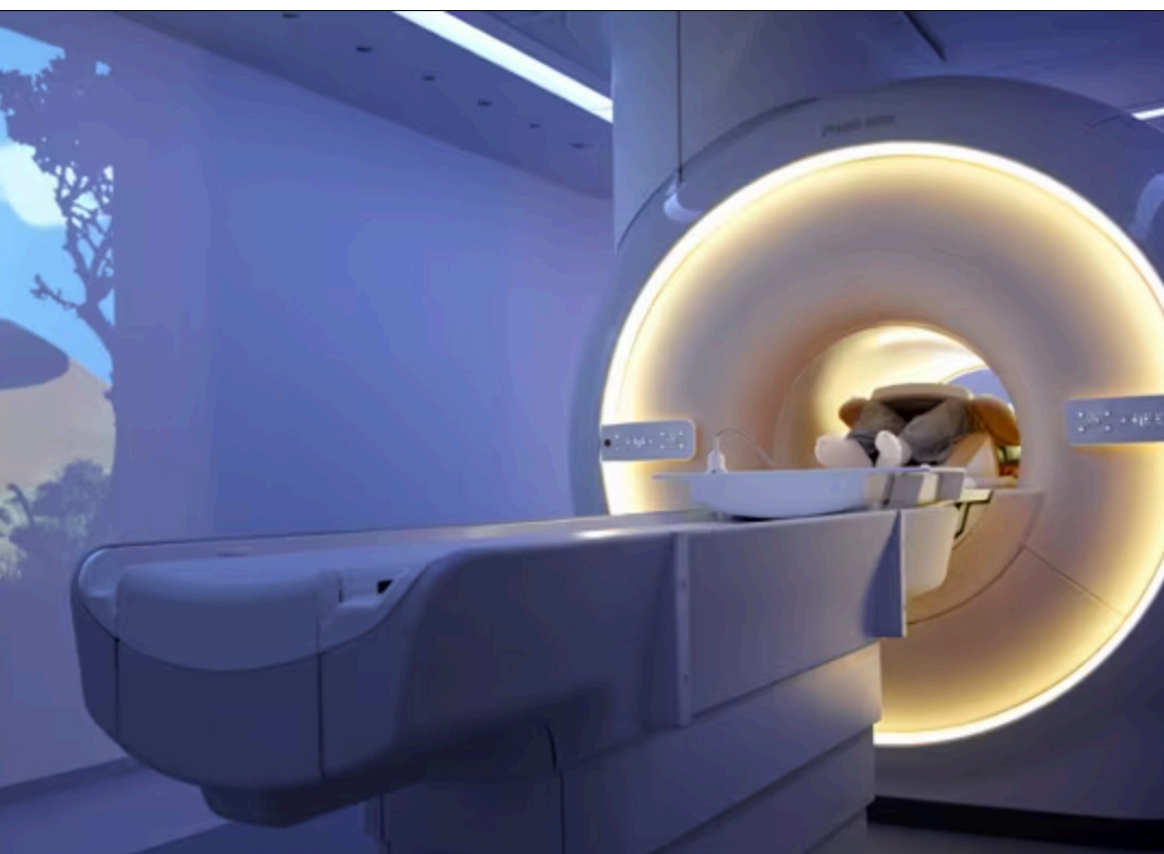


Le design d'intérieur des espaces où la perception de la lumière évolue continuellement, évoquant la transformation de l'environnement naturel, s'avère efficace dans les **zones de transit**. Les avions, en particulier, ainsi que les gares et autres espaces de transit, mettent en œuvre des solutions d'éclairage avancées qui offrent une perception de l'espace distincte de sa forme tangible.

Dans les vols long-courriers, un cycle jour et nuit est recréé à travers des teintes lumineuses. Parmi les exemples particulièrement réussis dans ce domaine, citons l'éclairage d'Island Air, qui recrée les aurores boréales avec un effet de mouvement, et Emirates Air, qui reproduit non seulement les couleurs du ciel, mais aussi le ciel étoilé. Parmi les autres projets notables, on retrouve notamment les designs de la gare centrale de Stockholm et de la gare d'Oslo, gérés par Light Bureau.



Un autre cas emblématique concerne les espaces de santé, des chambres des patients aux équipements de diagnostic, où des solutions d'éclairage sont mises en œuvre pour créer une perception de l'espace qui diffère du tangible pour offrir une atmosphère plus accueillante et naturelle. Il est scientifiquement prouvé que la perception d'un environnement naturel a un impact positif conséquent sur le rétablissement du patient. Parmi les projets notables dans ce domaine, citons le Phoenix Children's Hospital en Arizona et le scanner Spectral CT 7500 de Philips Healthcare, où les patients sont exposés à des scénarios d'éclairage changeants et rassurants.



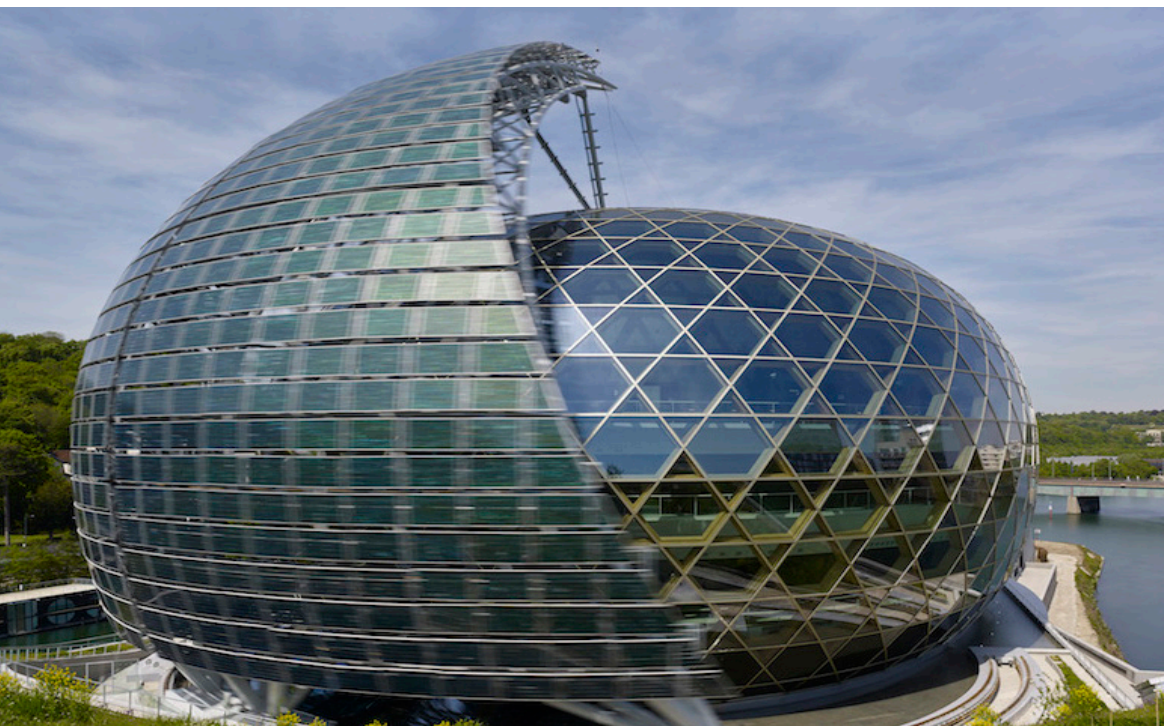
INNOVATION TECHNOLOGIQUE ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES SOLUTIONS D'ÉCLAIRAGE

STRATÉGIES D'ÉCLAIRAGE ÉCOÉNERGÉTIQUES ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'efficacité énergétique est un pilier fondamental du design d'éclairage moderne. Les solutions à faible consommation d'énergie réduisent non seulement les coûts d'exploitation, mais contribuent également à réduire l'empreinte environnementale des bâtiments résidentiels, commerciaux et publics. Le développement rapide de la technologie LED, qui utilise jusqu'à 80 % moins d'énergie que les ampoules à incandescence, a considérablement réduit la consommation d'énergie tout en prolongeant la durée de vie des appareils d'éclairage. Cette réduction de la consommation d'énergie réduit la fréquence de remplacement et minimise par conséquent l'impact des déchets. De plus, les systèmes avancés de gestion de l'éclairage permettent une surveillance et un contrôle précis de la consommation d'énergie et la planification d'interventions en temps opportun, qui optimisent l'efficacité globale.

Le choix du **luminaire** en lui-même dépend quant à lui de facteurs critiques, tels que la durabilité du processus de fabrication, l'utilisation de matériaux pouvant être réintroduits dans le cycle de production et la possibilité de remplacer des composants individuels plutôt que l'ensemble de l'appareil.

En termes de design d'éclairage, l'une des stratégies les plus efficaces est la **récolte de la lumière du jour**, qui consiste à intégrer la lumière naturelle aux systèmes de contrôle automatisés. Des capteurs intelligents adaptent l'intensité de l'éclairage artificiel en fonction de la quantité de lumière naturelle disponible dans un espace pour garantir un environnement bien éclairé en évitant le gaspillage. Cette approche est particulièrement utile dans les bureaux dotés de grandes fenêtres ou dans les espaces commerciaux, où la quantité de lumière naturelle varie tout au long de la journée.



Parallèlement, l'efficacité énergétique continue à tenir une place importante et à influencer le design de l'éclairage. Les technologies LED hautement efficaces sont de plus en plus utilisées et associées à des systèmes d'énergie renouvelable, tels que des panneaux solaires intégrés de manière harmonieuse dans les projets et produits architecturaux.

Comme **La Seine Musicale** à Paris, où l'ensemble du système d'éclairage extérieur est alimenté par une voile photovoltaïque rotative. Conçue par Shigeru Ban et Jean de Gastines, la voile suit le mouvement du soleil pour maximiser la production d'énergie, tandis que le système d'éclairage LED minimise la consommation.

Ces tendances, qui représentent la convergence de l'innovation centrée sur l'humain et de la responsabilité environnementale, ouvrent la voie à des solutions d'éclairage qui améliorent à la fois l'expérience humaine et la durabilité écologique.

Concevoir en tenant compte de la durabilité signifie non seulement respecter l'environnement, mais aussi se conformer aux réglementations dans un marché de plus en plus axé sur ces questions. Cela donne lieu à des bâtiments non seulement plus efficaces, mais aussi plus agréables à vivre et en harmonie avec le cadre naturel.

SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE INTELLIGENTS : IDO, INTÉGRATION DE L'IA ET TÉLÉCOMMANDES

L'éclairage intelligent représente l'un des développements les plus importants de ces dernières années, car il transforme les environnements architecturaux en espaces dynamiques, efficaces et personnalisables. Au cœur de cette révolution, on retrouve **l'Internet des objets** (IdO), qui permet aux appareils d'éclairage de communiquer entre eux, avec d'autres types d'appareils et avec les utilisateurs par le biais de réseaux numériques. Les capteurs de mouvement, par exemple, réduisent considérablement la consommation d'énergie en permettant l'activation de l'éclairage uniquement lorsqu'il est nécessaire. De même, les capteurs environnementaux peuvent ajuster l'intensité et la température de couleur de la lumière en fonction de la luminosité naturelle à l'extérieur ou des préférences de l'utilisateur.

L'intelligence artificielle (IA) est un autre outil qui peut être intégré dans les systèmes de gestion et de contrôle de l'éclairage. Des algorithmes avancés analysent les données collectées par les capteurs pour optimiser l'utilisation des ressources d'éclairage en temps réel et garantir un confort visuel maximal et un minimum de gaspillage d'énergie. Dans un environnement de bureau, un système d'IA peut par exemple prédire les heures d'occupation maximales et adapter l'éclairage pour fournir des conditions de travail optimales tout en équilibrant les économies d'énergie.

Le **contrôle** de ces systèmes de gestion peut par ailleurs se faire à distance grâce à des applications mobiles ou des logiciels centralisés, ce qui permet de gérer de grands bâtiments de manière efficace, simple et intuitive. Cette technologie, déjà largement adoptée dans les projets commerciaux, gagne également du terrain dans les espaces résidentiels et redéfinit les normes de confort et de durabilité.

Le développement parallèle de la **nanotechnologie** ouvre la porte à la domotique avancée et au mouvement Quantified Self (Q.S.), des nouvelles technologies qui permettent non seulement de gérer intelligemment les systèmes d'éclairage au niveau énergétique, mais aussi de contrôler et de moduler leurs effets sur le corps et l'esprit, en interprétant les données en temps réel. La capacité de collecter et d'utiliser des données physiologiques, qui reflètent avec précision les réponses aux stimuli externes sans risque d'interprétation subjective, est un privilège inédit.

Ces types d'automatisation sont particulièrement adaptés aux espaces occupés à long terme, comme les bureaux ou les maisons, dans lesquels un éclairage artificiel variable tout au long de la journée permet d'imiter la transition naturelle de la lumière du matin au soir en synchronisant efficacement le rythme circadien du corps.

Connu pour être l'un des bâtiments les plus durables au monde, The Edge à Amsterdam, un projet de PLP Architecture équipé de solutions d'éclairage Philips Lighting, incarne l'efficacité énergétique et l'éclairage centré sur l'utilisateur. Le bâtiment utilise un réseau avancé de luminaires LED connectés à un système d'éclairage numérique alimenté par la technologie IdO. Chaque lumière peut être contrôlée individuellement et s'ajuste en temps réel aux niveaux de lumière du jour, à l'occupation du bâtiment et aux préférences de l'utilisateur.

Les fenêtres qui s'étendent du sol au plafond offrent un apport de lumière du jour maximal, tandis que les capteurs de récolte de lumière du jour optimisent l'utilisation de l'éclairage artificiel. Cette approche réduit considérablement la consommation d'énergie tout en maintenant un environnement visuellement agréable. Grâce à l'association de son design d'éclairage et de ses systèmes écoénergétiques, pour laquelle il a obtenu la certification BREEAM Outstanding (remarquable), The Edge est aujourd'hui l'un des immeubles de bureaux les plus écologiques et les plus intelligents au monde.



CERTIFICATIONS ET NORMES D'ÉCLAIRAGE DURABLE

Les certifications internationales sont des repères essentiels pour concevoir des projets qui privilégient tant le bien-être psychologique et physiologique des occupants que la consommation énergétique des systèmes d'éclairage. Parmi les plus reconnus figurent la norme WELL Building Standard et LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), qui garantissent que les bâtiments répondent à des critères stricts d'efficacité énergétique et de qualité environnementale.

Le système **WELL Building Standard** se concentre sur la santé et le bien-être des occupants et comprend des critères spécifiques sur l'éclairage. Par exemple, les designs doivent intégrer des systèmes d'éclairage circadien pour soutenir le rythme biologique naturel des utilisateurs, en évitant une exposition excessive à la lumière bleue qui peut affecter négativement le sommeil et la santé générale. WELL prône également l'utilisation d'un éclairage sans scintillement pour réduire la fatigue oculaire.

Le système **LEED** évalue quant à lui l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment et récompense l'utilisation de technologies d'éclairage à faible consommation d'énergie et l'intégration de systèmes de contrôle automatisés. Pour obtenir des accréditations LEED, les projets doivent démontrer une réduction significative de la consommation d'énergie par rapport aux normes de base et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, comme des systèmes photovoltaïques, pour alimenter l'éclairage.

D'autres certifications, parmi lesquelles BREEAM et Green Globes, se concentrent sur des aspects spécifiques, comme la réduction de la pollution lumineuse et l'utilisation de matériaux durables dans les luminaires. Ces normes orientent non seulement les choix de design vers la durabilité, mais contribuent également à augmenter la valeur marchande des bâtiments, en attirant des investisseurs et des locataires de plus en plus conscients des problèmes environnementaux.

L'adoption de certifications est non seulement une preuve de responsabilité sociale, mais aussi un avantage concurrentiel qui positionne les concepteurs et leurs bâtiments en tant que leaders dans le paysage du design soucieux des écosystèmes et axé sur le bien-être.

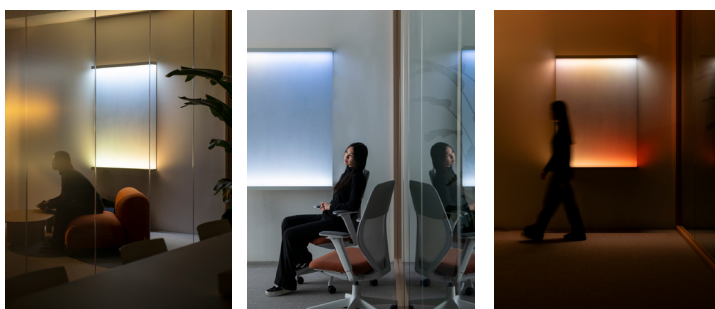
ANTICIPER LES BESOINS FUTURS EN ÉCLAIRAGE DES ESPACES EN ÉVOLUTION

INTÉGRATION DE L'ÉCLAIRAGE AUX MATÉRIAUX

Il est clair qu'un projet de design d'intérieur réussi harmonise un éclairage adapté avec les qualités spécifiques des matériaux et des finitions de l'espace. Voici quelques exemples de pratiques de design exemplaires à cet égard :

- Interaction entre lumière artificielle et surfaces métamériques
Un exemple dans ce domaine est le système innovant Ora Blu d'Erika Baffico (Fulcro Design). Le dispositif d'éclairage « Ora Blu » offre une simulation de la dynamique du ciel spécifique au site, conçue pour s'aligner sur les rythmes biologiques naturels dans les espaces confinés. Ce système innovant utilise des commandes intelligentes alimentées par des algorithmes et l'IA pour adapter les variables spécifiques au site et produire des scénarios de lumière à la fois cohérents et variés. La lumière LED émise interagit avec une peinture murale spécialement formulée, très sensible aux variations de lumière, qui donne à la surface une qualité mutable, presque « vivante ».
- Interaction entre lumière naturelle et surfaces filtrantes
Un exemple remarquable de surface filtrante est l'église Nostra Signora della Misericordia à Baranzate, conçue par Mangiarotti, Favini et Morassutti en 1957. Les murs extérieurs sont faits d'isolant en polystyrène expansé enfermé dans des panneaux de verre, qui diffusent la lumière naturelle uniformément dans toute l'église en créant une atmosphère douce et sereine. De même, la lumière filtrée dans les cathédrales gothiques à travers les vitraux projette des reflets ludiques de lumière colorée sur les sols et les éléments architecturaux qui enrichissent l'expérience spatiale.
- Interaction avec les textures de surface
Les murs et les sols interagissent naturellement avec la lumière. Des textures avec des profondeurs variables et des motifs en relief créent des contrastes saisissants et des ombres projetées. Lorsqu'elles sont appliquées sur des surfaces verticales, ces caractéristiques peuvent produire des changements d'apparence fascinants tout au long de la journée, à mesure que la direction de la lumière évolue.

Ces exemples démontrent comment l'intégration réfléchie de la lumière avec la matière et la texture permet de rehausser les espaces intérieurs et de créer des environnements à la fois fonctionnels et visuellement attrayants.



IMPACT DE LA LUMIÈRE SUR LE REVÊTEMENT DE SOL

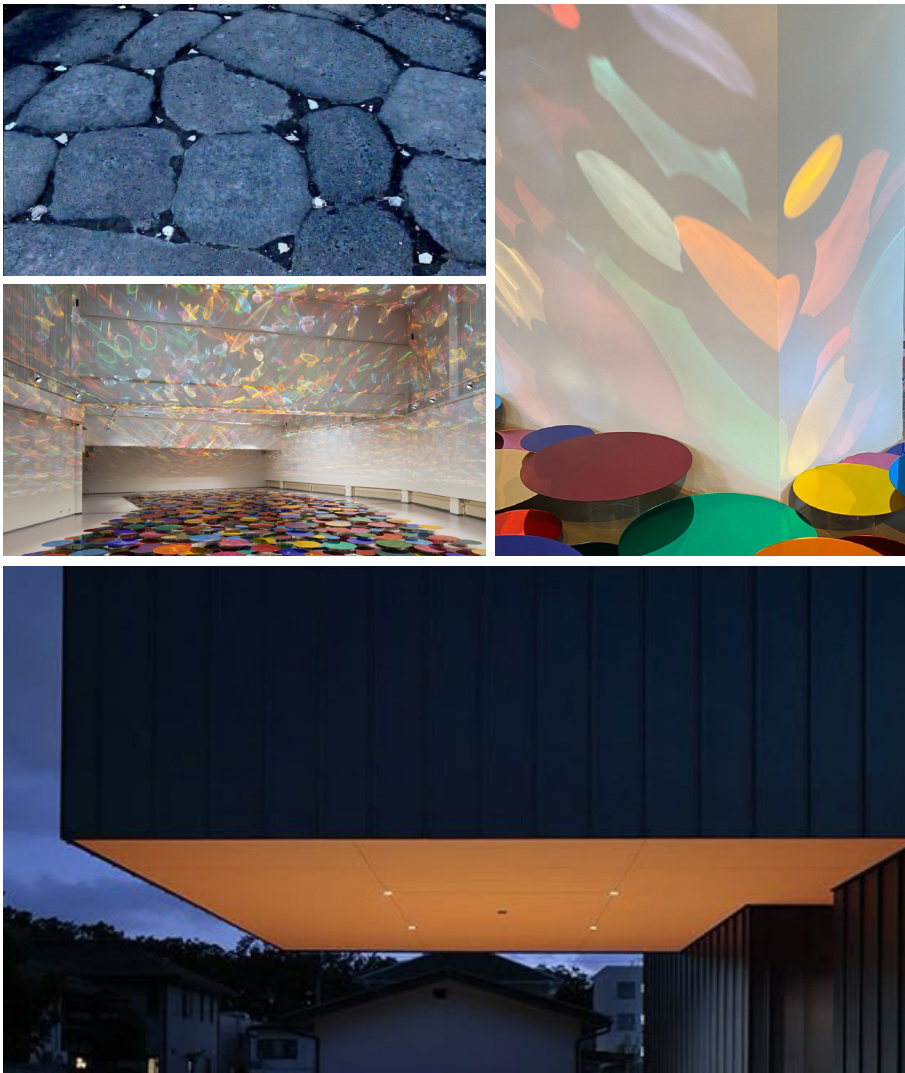
L'éclairage influence considérablement l'apparence et la fonctionnalité des revêtements de sol. Qu'ils soient composés de matériaux naturels ou artificiels, les sols interagissent avec la lumière de manière unique, car leurs caractéristiques absorbent, réfléchissent ou diffusent la lumière différemment.

La couleur du sol joue un rôle central dans la formation de l'intensité lumineuse perçue : les teintes plus foncées ont tendance à absorber plus de lumière, tandis que les tons plus clairs augmentent la luminosité. Il existe une hypothèse selon laquelle les anciens Romains ont tiré parti de ce principe pour illuminer les rues la nuit. Par exemple, à Pompéi, des preuves archéologiques révèlent des surfaces routières faites de grandes dalles de pierre grise entrecoupées de pierres blanches plus petites, conçues pour refléter le clair de lune ou la lumière des torches.

Les surfaces colorées peuvent également projeter leurs teintes sous la forme de lumière réfléchie. Le travail de l'artiste Liz West en est un exemple inspirant. Celle-ci utilise des filtres dichroïques placés sur le sol et des techniques de saignement des couleurs pour créer des jeux de lumière surprenants sur les murs et les plafonds.

Les sols blancs, d'autre part, peuvent agir comme de véritables réflecteurs. En effet, la lumière de spots de plafond dirigés vers le bas rebondit sur le sol blanc et est renvoyée vers le plafond en créant un effet d'éclairage presque magique.

Ces exemples mettent en évidence comment les revêtements de sol, lorsqu'ils sont associés à un éclairage bien conçu, peuvent devenir un élément essentiel de l'expérience visuelle et sensorielle d'un espace.



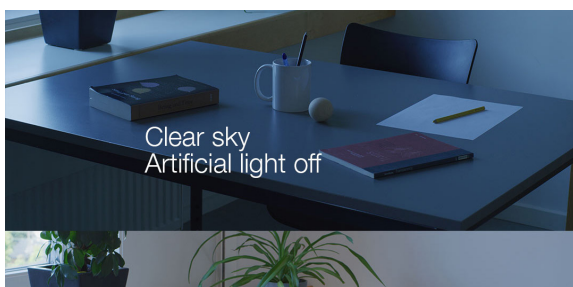
TENDANCES ACTUELLES DE L'ÉCLAIRAGE ARCHITECTURAL ET D'INTÉRIEUR

Les tendances dominantes du design d'éclairage architectural et d'intérieur contemporain témoignent d'un intérêt accru pour le bien-être psychologique et physiologique, soutenu par les progrès technologiques en matière de contrôle de l'éclairage et de miniaturisation des sources, ainsi que par un engagement en faveur de l'efficacité énergétique.

L'intégration de **l'éclairage centré sur l'humain (HCL)**, conçu pour s'harmoniser avec les écosystèmes naturels grâce à des systèmes d'éclairage dynamiques, prend de l'ampleur. Cette approche vise à améliorer le bien-être humain en imitant les rythmes naturels de la lumière du soleil. L'éclairage centré sur l'humain, qui utilise des systèmes qui adaptent la température de couleur et l'intensité lumineuse tout au long de la journée pour s'aligner sur les cycles circadiens, est de plus en plus mis en œuvre dans les bureaux, les hôpitaux, les écoles et les résidences.

L'initiative Double Dynamic Lighting (DDL) représente un projet historique dans ce domaine et un effort de recherche collaboratif entre les leaders de la technologie d'éclairage Tridonic, iGuzzini, Fagerhult, Zumtobel et l'Université d'Aalborg. Le DDL introduit un concept de design d'éclairage intérieur dynamique qui combine la lumière naturelle avec la lumière artificielle pour répondre aux conditions fluctuantes du ciel.

L'éclairage électrique s'adapte dynamiquement en temps réel pour compléter la lumière naturelle du jour et créer des environnements plus agréables et plus sains. Dans des études menées à l'Université d'Aalborg, les participants exposés au DDL sur de longues périodes ont rapporté une atmosphère plus confortable, ainsi que des améliorations de la motivation, de la concentration et du flux de travail. Ces résultats soulignent le potentiel du DDL à révolutionner le design de lieux de travail créatifs, d'établissements d'enseignement et d'établissements de soins de santé.



CONCLUSION ET RÉFLEXIONS FUTURES SUR L'ÉCLAIRAGE DANS LE DESIGN

L'avenir sera dominé par la création de solutions d'éclairage qui non seulement valorisent l'environnement qui nous entoure, mais qui reproduisent également la qualité de la lumière naturelle à l'intérieur. Cette approche vise à améliorer la qualité de vie en favorisant le bien-être physique, émotionnel et intellectuel. Un éclairage qui privilégie ces aspects peut influencer positivement les relations interpersonnelles, la productivité et la satisfaction globale. À l'avenir, le design d'éclairage intégrera de plus en plus de technologies de pointe, telles que l'IA et l'IdO, pour créer des environnements réactifs et économes en énergie qui répondent à la fois aux besoins humains et de développement durable. L'avenir de l'éclairage fusionnera harmonieusement l'expérience humaine avec la gérance de l'environnement, pour le bien de l'Homme et de la planète.

SUGGESTIONS DE LECTURE

- Junichiro Tanizaki, In Praise of Shadows, 1977 by Leete's Island Books
- Lorenzo Simoni, My Lighting Handbook, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017 3°edizione
- Beppe Finessi, Fare Luce, Corraini, Mantova 2017
- Gino Sarfatti – Il design della luce, Corraini, Mantova 2012

SOURCE DES CITATIONS

- Kevin W. Houser e Tony Esposito, Human-Centric Lighting: Foundational Considerations and a Five-Step Design Process, Articolo in Frontiers in Neurology, January 2021
- Laura Bellia e Francesca Fragliasso, Good Places to Live and Sleep Well: A Literature Review About the Role of Architecture in Determining Non-Visual Effects of Light, Articolo in International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021
- Jorrit Tornquist, Colore e Luce. Teoria e Pratica, Milano, Istituto del Colore, 1999
- AA.VV., Psicologia della percezione, Milano, Mazzotta, 1979
- AA.VV., James Turrell. Geometrie di luce - Roden Crater Project, a cura di Agostino de Rosa, Milano, Electa, 2007
- Rotaliana (a cura di Ascione, Lauda, Malisan), Tutto quello che avreste voluto sapere sulla luce, ma non avete mai osato chiedere, Trento 2019
- Giovanni Traverso, Modeling daylight, Guetersloh Germany, Via Verlag, 2015
- Barbara Gherrì, Luce naturale e daylight assesment. Nuovo protocollo per la valutazione degli spazi confinati, Dottorato di ricerca, Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura
- Alvar Aalto, Architettura per leggere, Architecture to read, catalogo della mostra "Architettura per leggere", Roma, Gangemi, 2003, pp. 112- 125.
- Carlo Bertelli, La luce e il progetto, in Francesco Dal Co e Giuseppe Mazzariol, Carlo Scarpa, Opera Completa, Milano, Electa, 1984-1992, pp. 191-194
- Marck S. Rea, Ph.D., Light. Much More Than Vision, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, 2007
- MS Rea Lighting Research Center, The lumen seen in a new light: making distinction between light, lighting and neuroscience, 2015
- Jorrit Tornquist, Il colore perché la città sia labirinto di sorprese, Torino, Gazzetta dei Popolo, 31 Gennaio 1979
- Matteo Zambelli, Jorrit Tornquist - Il progetto cromatico della torre del Termoutilizzatore di Brescia, in Firenze Architettura (1, 2017), pp. 146-153
- Velux Group, Daylight as a driver of change, Daylight & Architecture Magazine, Issue 24, Autumn 2015
- Christian Norberg-Schulz e Gennaro Postiglione, Sverre Fehn. Opera Completa, Milano, Mondadori, 1997, pp.20, 42, 46, 55.
- Henry Plummer, The architecture of natural light, Londra, Thames & Hudson, 2012