

Stefan Gasser | Daniel Tschudy

L'éclairage intérieur

Efficacité énergétique de l'éclairage



suisse énergie
Notre engagement : notre futur.

EnDK
Conférence des directeurs
cantonaux de l'énergie

faktor
Architektur Technik Energie

Contenu

1. La lumière	5	6. Commande et régulation	103
1.1 Exploration de la lumière	5	6.1 Bases	103
1.2 Rayonnement électromagnétique	6	6.2 Détecteurs de mouvement et de présence	105
1.3 Voir et percevoir	7	6.3 Luminaires intelligents en réseau	109
1.4 Les termes techniques de la lumière	19	6.4 Cellule photo pour l'enregistrement de la lumière du jour	112
1.5 Le marché de l'éclairage et le potentiel d'économie	23	6.5 Efficacité et autoconsommation électrique	114
2. Evaluation énergétique	27	6.6 Projet de mesure des luminaires à capteurs intégrés	115
2.1 L'étiquette-énergie	27	6.7 Eclairage des couloirs avec des LED (projet pilote)	118
2.2 Interdiction des lampes halogènes	29	7. Conception et optimisation	123
2.3 Obligation de déclaration	30	7.1 Bases de la planification d'éclairage	123
2.4 Aperçu sur l'étiquette-énergie	32	7.2 Exemples d'optimisation	125
2.5 Norme SIA 387/4	33	7.3 Norme d'éclairage	
2.6 Standard Minergie	49	SN EN 12464-1:2013	130
2.7 Autres applications de la SIA 387/4	50	7.4 Nouvelle norme sur la lumière du jour EN 17037	134
2.8 Outils de calcul	51	7.5 Optimisation de fonctionnement dans les bâtiments existants	140
2.9 Contrôle de l'éclairage des bâtiments utilitaires	53	7.6 Rentabilité	144
2.10 Autres labels	59	7.7 Économies potentielles en éclairage	145
3. Lampes	63	7.8 Utilisation de l'obscurité	147
3.1 Typologie des lampes	63	8. Etudes de cas	149
3.2 Radiateur thermique	64	8.1 Ecole Leutschenbach	149
3.3 Lampes fluorescentes	65	8.2 Centre des congrès Davos	153
3.4 Lampes à décharge	66	8.3 Technorama de Winterthur	157
3.5 Mesure des lampes	68	8.4 Bibliothèque cantonale Liestal	161
3.6 Lampes économiques	70	8.5 Halle d'expositions Dornbirn	165
4. LED – diodes électroluminescentes	71	8.6 National Gallery, Irlande	168
4.1 Objectifs de performance des LED	71	8.7 Lakeside Lucerne	170
4.2 Caractéristique des LED	73	8.8 Bâtiment Floyd Genève	171
4.3 Qualité de lumière et rendu des couleurs	75	8.9 Ecole Bläsi	173
4.4 Guidage optimisé de l'éclairage	79	8.10 Bâtiment administratif Altstätten	176
4.5 Innovations LED	81	8.11 Bâtiment administratif Pully	178
4.6 Test de lampes LED à filaments	84	8.12 mmeuble commercial Quadrolith	180
4.7 Idées fausses sur les LED	87	9. Annexe	183
5. Luminaires	89	9.1 Auteurs	183
5.1 Luminaires professionnels et domestiques	89	9.2 Informations complémentaires	184
5.2 Typologie	93	9.3 Index des mots clés	186
5.3 Mesure des luminaires	96		
5.4 Luminaires Minergie	98		

Impressum

L'éclairage intérieur – Efficacité énergétique de l'éclairage

Auteurs: Stefan Gasser, Daniel Tschudy

Révision et mise en page:

Faktor Journalisten AG, Zurich;
Othmar Humm, Christine Sidler,
Sandra Aeberhard

Traduction et relecture:

Christine Müller Ulrich, Werner Ulrich,
Saillon (VS)

Cet ouvrage fait partie de la série de publications spécialisées «Construction durable et rénovation». Elle est financée par l'Office fédéral de l'énergie OFEN / EnergieSuisse et la Conférence cantonale des directeurs de l'énergie (EnDK).

Photo de couverture: Bâtiment Floyd, siège de JTI, Genève. Photo: Hufton and Crow

Commande: À télécharger (gratuitement) sous www.energieschweiz.ch ou sous forme de livre auprès de Faktor Verlag, info@faktor.ch ou www.faktor.ch

2^e édition mise à jour, novembre 2019

Remerciements

Les entreprises Regent, Swisslux et Zumtobel ainsi que la ville de Zurich (Amt für Hochbauten) ont apporté leur soutien financier à la réalisation de cet ouvrage.



Stadt Zürich
Amt für Hochbauten



ZUMTOBEL



REGENT
L i g h t i n g



Un bon éclairage

Depuis la première édition du livre spécialisé «L'éclairage intérieur» en 2012, les technologies de production de lumière et de commande de l'éclairage ont énormément évolué. L'éclairage LED est aujourd'hui à la pointe de la technologie. Comparé aux lampes halogènes, le rendement des LED a été multiplié par 10, tandis que celui des lampes fluorescentes a doublé. Le remplacement à grande échelle des lampes et des luminaires existants par des LED réduirait au moins de moitié la consommation d'électricité pour l'éclairage au cours des prochaines années; la production d'électricité d'une centrale nucléaire entière (environ 3 TWh/a) pourrait ainsi être économisée. De nouvelles connaissances sont également disponibles sur l'effet et l'utilisation de la lumière du jour. Cette évolution de la qualité technique a grandement amélioré l'éclairage des espaces de travail et d'habitation.

Il ne fait aucun doute que le potentiel diversifié de l'électronique a un impact non négligeable. C'est le cas, par exemple, de la détection de personnes en fonction de la présence pour la commande des systèmes d'éclairage. L'utilisation de détecteurs de présence haute fréquence permet de détecter la taille et la vitesse d'un objet en mouvement – sans qu'il soit nécessaire d'acquérir des images. Aujourd'hui, il est également possible de régler, sans bruit, des sources lumineuses Retrofit adaptées aux habitations privées. Les nouveaux concepts d'utilisation de la lumière du jour ne sont pas seulement intéressants d'un point de vue économique, ils permettent également d'améliorer la physique du bâtiment et la technique d'éclairage.

Cette version entièrement revue et mise à jour de la publication spécialisée «L'éclairage intérieur» traite de l'équilibre économique entre une qualité d'éclairage exemplaire et une efficacité énergétique élevée. L'objectif reste le même, mais les systèmes et les composants qui lui conviennent sont pour la plupart nouveaux ou du moins en grande partie modifiés.

Un bon éclairage est essentiellement lié aux particularités d'un espace: la géométrie de la pièce, la texture et les couleurs des surfaces. Ce n'est donc pas par hasard si les auteurs, un architecte et un ingénieur, peuvent répondre ensemble du contenu de cet ouvrage. En outre, cette méthode de travail interdisciplinaire permet de meilleures mises en perspective. Parce qu'un bon éclairage, c'est à la fois la technologie et l'architecture.

Stefan Gasser, Daniel Tschudy

La lumière

1.1 Exploration de la lumière

Plus de 90 % de nos perceptions passent par nos yeux. Pour identifier notre environnement et pour nous orienter, nous avons besoin de la lumière (Illustration 1.1).

Exploration scientifique de la lumière

■ Il y a 2500 ans, les philosophes grecs ont supposé que la lumière était projetée à partir des yeux sur les objets, pour les palper comme avec les doigts. Ce n'est qu'au début du XVIIe siècle que l'on découvrit que ce n'était pas la personne qui projetait les images, mais que les images du monde extérieur étaient projetées dans nos yeux selon le principe de la «chambre noire».

■ L'astronome **Galilée** (1564–1642) fut le premier à essayer de mesurer la vitesse de la lumière, le temps dont a besoin un signal lumineux pour atteindre un lieu éloigné. Il dut constater qu'avec cette méthode, seul le temps de réaction, et non la vitesse de la lumière, pouvait être mesuré.

■ **Newton** (1642–1727), l'un des fondateurs de la physique classique, a présenté la lumière comme étant un flux de petites particules qui sort de tous les objets éclairés (théorie corpusculaire).

■ Le physicien **Huygens** (1629–1659) a utilisé le modèle des ondes (théorie des ondes) pour expliquer la lumière. Les impulsions énergétiques ou les oscillations seraient diffusées comme les ondes se propageant dans l'eau, mais dans l'espace et non pas sur une surface comme pour l'eau: une erreur, comme cela s'est révélé plus tard.

■ L'astronome danois **Römer** (1644–1710) a constaté que la durée de révolution des satellites de Jupiter était différente, ce que la physique ne pouvait expliquer. Les différences de temps ont été obtenues à partir des différentes distances de Jupiter à la Terre et de la vitesse limite de la lumière qui ont faussé le résultat observé. Cette observation a montré pour la première fois que ce que nous voyons et mesurons également ne correspond pas obligatoirement à la réalité. Peu de temps après, il fut possible de mesurer pour la première fois la vitesse de la lumière avec un appareil mécanique.

■ Le physicien anglais **Maxwell** (1831–1879) a développé la théorie des phénomènes électromagnétiques dans le vide et dans l'atmosphère, étant ainsi à l'origine de l'électrodynamique. Il a été le premier

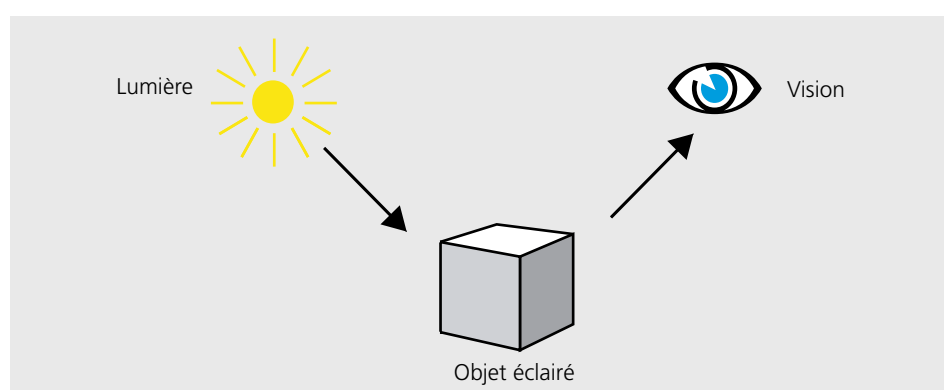


Illustration 1.1: Lumière, éclairage, vision.



Illustration 1.2: La galerie des physiciens de la lumière.

à expliquer que la lumière faisait également partie du spectre des ondes électromagnétiques.

■ **Einstein** (1879–1955) a révolutionné toutes les notions de la physique classique. La relativité de l'espace, du temps, de l'énergie et de la matière se base en grande partie sur l'étude de la lumière et de sa vitesse limite.

1.2 Rayonnement électromagnétique

Une différence significative entre les ondes lumineuses et les ondes élastiques, comme les ondes aquatiques et sonores, est qu'elles ont besoin de l'eau, de l'air ou d'un gaz pour se propager. Mais la lumière arrive également jusqu'à nous en traversant le vide intersidéral, par exemple à partir d'une étoile de la voie lactée. La longueur des ondes lumineuses est très petite, plus petite qu'un millième de millimètre. La lumière ayant une longueur d'onde d'environ 600 nm est perçue comme lumière rouge, la lumière ayant une longueur d'onde de 400 nm étant perçue comme lumière bleue. La longueur d'onde et la couleur sont donc

directement liées. Les ondes lumineuses visibles pour l'œil humain se situent dans le «champ médian» des ondes électromagnétiques (Illustration 1.3 et Tableau 1.1).

■ Le degré de nocivité des ondes électromagnétiques pour l'organisme est au cœur de débats houleux. La nocivité des rayons gamma et des rayons X est connue et prouvée.

■ Les rayonnements ultraviolet (UV) et infrarouge (IR) sont également nocifs à hautes doses, toutefois la lumière visible (située entre la lumière UV et IR) est essentielle pour la reproduction et la croissance des humains, des animaux et des plantes.

■ Pour les micro-ondes et les ondes radio, dont font partie les réseaux sans fil LAN et des téléphones portables, la nocivité n'a pas encore été démontrée. Mais on peut imaginer que ces ondes ayant une longueur d'onde du domaine du centimètre pourraient avoir des répercussions sur l'organisme.

■ Les ondes à basse fréquence, comme les réseaux électriques, mais également l'électronique de puissance de tout type (p. ex. dans les lampes économiques), possèdent des longueurs d'onde de plusieurs

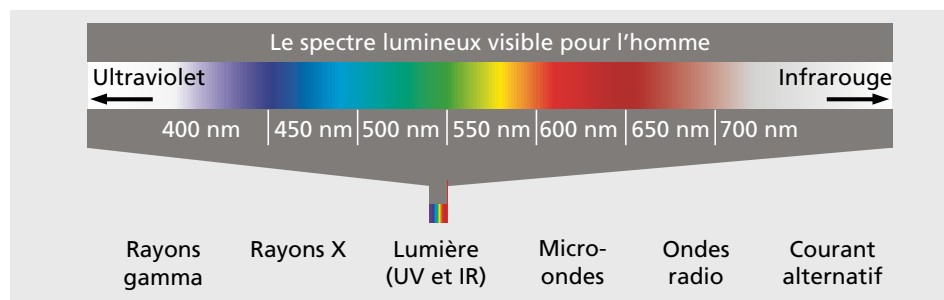


Illustration 1.3:
La lumière visible
comme onde électromagnétique.

Source du rayonnement	Fréquence	Longueur d'onde
Réseau électrique	50 hertz	6000 km
Lampe économique (B.E.)	50 kilohertz	6 km
Radiodiffusion très hautes fréquences	100 mégahertz	3 m
Réseau de téléphones portables (GSM 900)	0,9 gigahertz	33 cm
Micro-ondes, radar, WLAN	2,5 gigahertz	10 cm
Infrarouge	300 térahertz	1000 nm (= 0,001 mm)
Lumière visible	430 THz à 750 THz	700 nm à 400 nm
Ultraviolet	1000 térahertz	300 nm (= 0,0003 mm)
Rayons X	1 000 000 térahertz	0,3 nm
Rayonnement gamma (radioactivité)	1 Mrd. térahertz	0,0003 nm

Tableau 1.1:
Exemples de rayonnement électromagnétique.

kilomètres, un phénomène de résonance n'est donc pas possible ici. Toutefois, la puissance des ondes émises joue également un rôle et elle est bien plus élevée pour les ondes à basse fréquence que pour celles à haute fréquence.

1.3 Voir et percevoir

La faculté visuelle et de perception de l'œil est considérable. Avec le globe oculaire qui est bien plus petit qu'un bon objectif photo, l'œil peut, avec un petit centre de calcul de quelques centimètres carrés, produire des images dans le cerveau qui sont largement supérieures à celles du meilleur appareil photo.

■ **L'objet:** Le processus de la vision est soumis à la présence d'un objet éclairé. La gamme de luminosité que l'œil peut traiter va de «très sombre» à «très clair» et atteint jusqu'à 1 milliard.

■ **Voir:** L'œil voit l'objet et crée une image sur la rétine selon le principe de la caméra optique. L'image est projetée sur la rétine en traversant la cornée, la pupille et le cristallin. Elle contient environ 130 millions de récepteurs photosensibles (bâtonnets pour la luminosité et cônes pour les coloris) et de nombreuses connexions nerveuses ayant de multiples et complexes mécanismes de commutation. La cornée et le cristallin garantissent la précision de l'image sur la rétine, la pupille permet d'ajuster l'exposition de la rétine.

■ **Perception:** A l'intérieur du corps, la transformation du stimulus lumineux qui apparaît sur la rétine s'appelle la perception. Les informations de l'image sont transmises en temps réel, via les voies nerveuses, au centre de la vision dans la partie occipitale du cerveau où deux à trois milliards de cellules lisent alors sur l'aire corticale visuelle les signaux émis et les transforment en image dans le petit centre de calcul de quelques centimètres carrés.

■ **Association:** Chaque information visuelle déclenche des associations dans le centre de la vision du cerveau: l'image reçue est complétée avec des images sauvegardées dans la mémoire et cet assemblage donne l'image finale. Il existe donc un mélange entre savoir (image mémorisée) et vision. Par conséquent, un objet visuel peut également être identifié même lorsqu'il n'est que partiellement visible. L'œil reproduit certes la réalité de manière objective, mais ce que nous voyons est une version de l'image manipulée par le cerveau. Contrairement à la caméra, le cerveau n'est pas un appareil passif.

Comment l'œil ressent la luminosité

La photosensibilité de l'œil humain est la mesure de la sensation de luminosité des différentes longueurs d'onde du spectre visible. La courbe de la sensibilité spectrale présente un maximum en vision de jour à 555 nm (vert-jaune) et redescend à

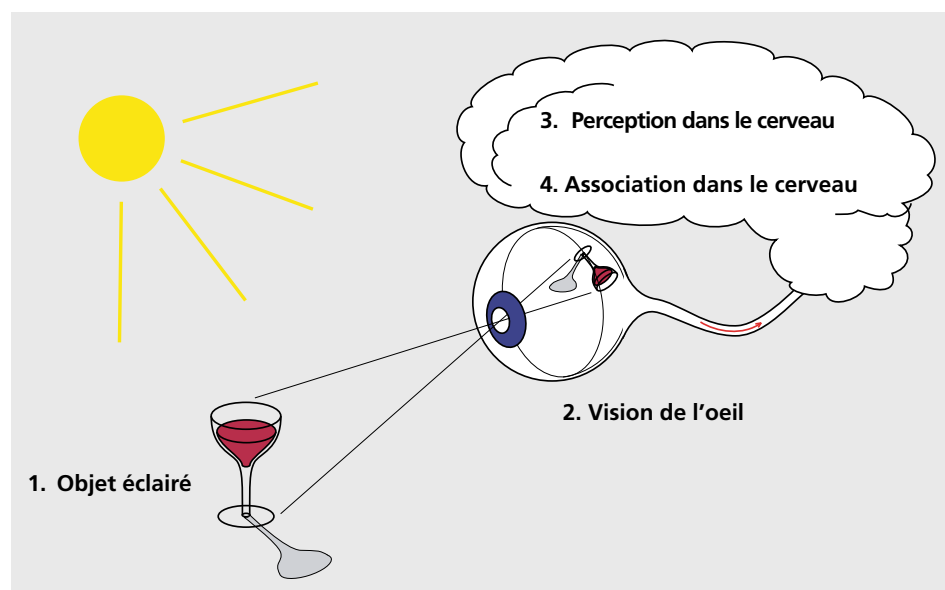


Illustration 1.4:
Vision et traitement
des images.

presque zéro pour 400 nm et respectivement 700 nm. Comme les gens ressentent très différemment les effets de la lumière, la courbe n'est valable que pour l'œil humain bénéficiant d'une vision normale. La sensibilité spectrale est différente le jour et la nuit (Illustration 1.5).

Effets biologiques de la lumière

En plus des associations, les effets biologiques de la lumière jouent également un rôle important dans la perception. La chaîne des effets de la lumière suit des connexions nerveuses séparées allant de la rétine à l'hypophyse (organe de commande centrale des fonctions de l'organisme). C'est l'hypophyse qui influence le métabolisme et le système hormonal. Le rythme est surtout déterminé par la lumière du jour. La «bonne» lumière favorise par conséquent les capacités de concentration, améliore la motivation et empêche la fatigue prématurée. Ce qui accroît la productivité, même pour les activités qui dépendent peu ou pas du tout de la vision, comme par exemple la réflexion. Cet effet est essentiellement déclenché par la lumière qui pénètre latéralement dans l'œil. Par conséquent, dans les espaces de travail, il est important de bien éclairer non seulement les lieux de travail mais également leur environnement. En effet, les éclairagements lumineux inférieurs à 500 lux ne sont pas suffisants. La lumière du jour ne peut pas être complètement remplacée par l'éclairage artificiel.

Processus de la perception

En science, on fait aujourd'hui la distinction entre les processus visuels et les processus non visuels. Les processus visuels étant:

- La vision à proprement parler (via les cônes et les bâtonnets)
- La perception de notre réalité subjective
- En partie, les processus chronobiologiques également déclenchés via les cônes et les bâtonnets.

Les processus non visuels montrent que les effets de la lumière sont plus importants que nous le pensons:

- Influence hormonale via la surface de la peau
- La lumière en tant que stimulateur chronobiologique
- Influence d'un grand nombre de processus continus dans le corps par l'effet direct des cellules visuelles et des ganglions sans déclencher de processus visuels.

Processus visuels

Dans l'obscurité, seuls les bâtonnets sont stimulés. Ils sont environ 100 000 fois plus sensibles que les cônes. Ainsi, une vision suffisante, même la nuit, est possible. Comme il n'existe qu'un type de bâtonnets, seules les valeurs de luminosité peuvent être différenciées. En plus des quelques 120 millions de bâtonnets, l'œil contient environ 6 millions de cônes. La plus forte concentration se situe dans la fovéa (rétine, acuité visuelle la plus élevée). Les cônes possèdent différentes sensibilités spectrales. Environ 12 % des cônes sont essentiellement sensibles au bleu, les 88 % restants sont sensibles au rouge et au vert. En plus de la vision obtenue avec les cônes (vision des couleurs, vision photopique) et de la simple vision nocturne obtenue avec les bâtonnets (valeurs de gris, vision scotopique), il y a également la vision méso-pique, une zone intermédiaire dans laquelle la vision des couleurs et la vision nocturne sont possibles.

Les théories de la perception se basent sur des processus visuels. On distingue alors le processus d'apprentissage (système stimulus-réponse) et le programme (concept mental, perception look-up d'après Gregory). Les processus d'apprentissage peuvent être désignés comme l'obtention d'un degré de réussite par entraînement, et cela relativement clairement via le système stimulus-réponse, et le concept qui en résulte, la perception de look-up. Le système stimulus-réponse constitue donc la voie et la perception look-up l'objectif. Les feux tricolores montrent par exemple comme stimulus le passage du rouge au vert. Comme réponse, l'automobiliste déplace son pied de la pédale de frein vers la pédale d'accélération. Ces systèmes se caractérisent de manière typique par les

temps de réaction qui y sont liés. Même si les temps de réaction via la vision périphérique peuvent en outre être raccourcis, ils restent présents.

Grâce aux informations des yeux, le concept le mieux adapté ou le plus probable est sélectionné et utilisé pour la perception. Comme le montre l'illustration 1.6, des modifications uniformes dans les informations sensorielles peuvent conduire à une modification brutale du concept mental sélectionné. Exemple du passage d'un concept mental à un autre: lors d'un mouvement oculaire de la gauche vers la droite, le concept mental «Homme» change en concept «Femme». De droite à gauche, la transition a lieu à un autre endroit.

Quel est l'avantage du concept sur le processus d'apprentissage? En principe les deux sont nécessaires pour conserver ce qui a été appris et pour s'améliorer dans

une discipline. Par ailleurs, les concepts peuvent être également disponibles plus rapidement. Les avantages de la perception look-up par rapport au simple système stimulus-réponse sont:

- Aucun retard: exemple de la balle qui s'approche, concept mental de la trajectoire (influence positive de l'éclairage).

- Evaluation des propriétés: exemple de la perception d'une surface de table par l'habitude. (L'éclairage n'a aucune influence; phénomène de la constance; les nouveaux objets inconnus pourraient être plus difficiles à évaluer).

- La perception look-up peut répondre à l'absence de propriétés. (Exemple: le motif de Kanizsa. Bien que les lignes ne soient pas du tout présentes, elles sont perçues). Ceci serait impossible avec le système stimulus-réponse, car sans stimulus aucune réaction n'est possible (exemple: luminances élevées sans informations).

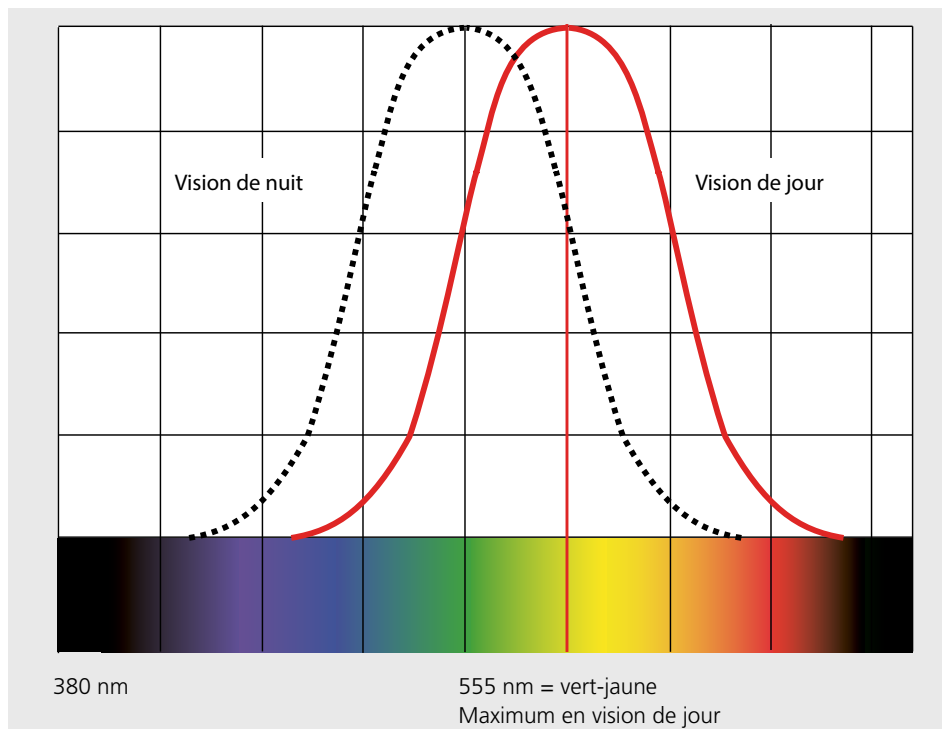


Illustration 1.5:
Perception visuelle de l'humain pour les différentes températures de couleur.

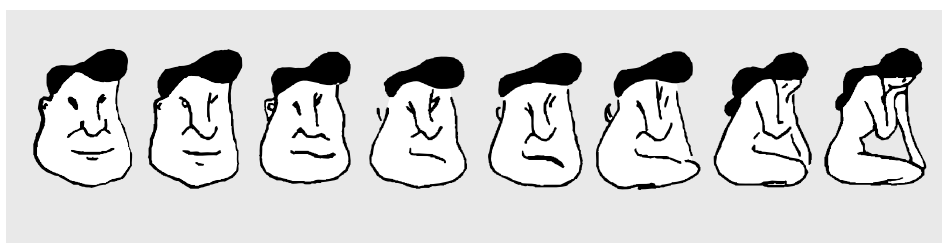


Illustration 1.6:
Le concept mental se modifie selon l'orientation choisie.

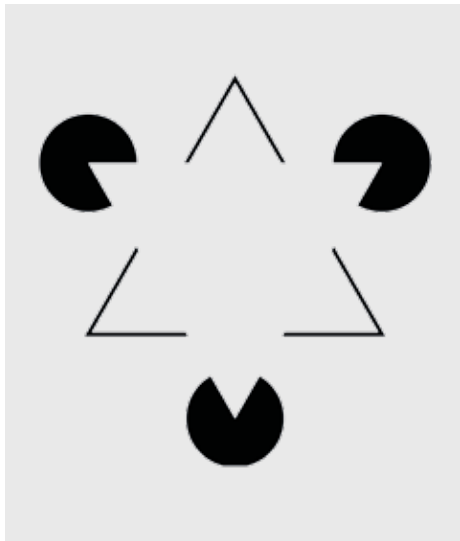


Illustration 1.7:
Triangle de Kanizsa;
clairement recon-
naissable même en
l'absence de
contours.

■ La perception look-up peut combler des manques d'information en peu de temps. Ceci se produit par exemple quand l'œil cligne. Bien que l'image disparaisse sur la rétine de l'œil, l'environnement est perçu dans le temps comme continu (exemple de la maison derrière l'arbre).

Des structures déterminées interpellent des concepts mentaux similaires chez des personnes ayant des bases culturelles similaires, en d'autres mots: elles ont un effet communicatif.

La constance des angles, des couleurs, des tailles et des luminosités forme alors dans le processus de perception un lien important avec les processus de correction appris

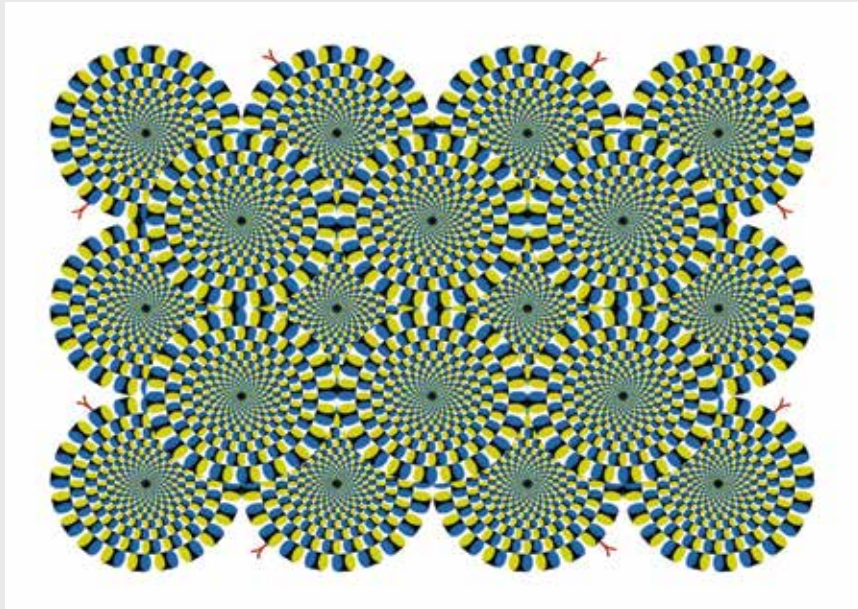


Illustration 1.8:
Le mouvement
comme prestation
propre du cerveau
est déclenché par
l'inhibition latérale
(renforcement du
contraste des
bords).

Illustration 1.9:
Lorsqu'on essaie de
lire les couleurs des
mots, le cerveau
droit tente d'inter-
préter ces mots. Il a
de la peine à
s'adapter. Le cer-
veau gauche a éga-
lement de la peine
à reprendre la di-
rection.

JAUNE BLEU ORANGE
NOIR ROUGE VERT
VIOLET JAUNE ROUGE
ORANGE VERT NOIR
BLEU ROUGE VIOLET
VERT BLEU ORANGE

et mémorisés. En outre, une propriété caractéristique de la perception est de privilégier des interprétations simples et compréhensibles (symétrie, lois des formes, etc.). Les stimuli extérieurs ne sont pas seulement perçus de manière rationnelle, mais ont également un effet au niveau émotionnel. Ce ressenti individuel et superposé de l'environnement et de ses objets peut être interprété comme agréable ou désagréable, comme apaisant ou stimulant, comme contrôlé ou non, etc. Cette évaluation s'appelle la coloration affective où la reconnaissance des formes et l'évaluation affective s'influencent réciproquement. Nous avons tendance par exemple à refouler des stimuli non intéressants sur le plan affectif. Par ailleurs, il s'avère qu'une coloration affective est soumise aux courants temporels, suivant ainsi les mutations du temps (idéal de beauté, énergie nucléaire, design automobile, utilisation de matériaux, etc.).

Ces stimulations extérieures peuvent par ailleurs être influencées par une évaluation propre. La représentation, suscitée par les médias, les conversations, ce qui a été entendu ou vu, induit une certaine perception qui peut avoir des effets positifs ou négatifs sur la santé. Les exemples sont nombreux dans ce sens, même s'ils sont souvent mal interprétés ou qu'ils sont proches de la superstition. Par exemple le débat public sur le spectre visible non naturel et donc malsain des lampes fluorescentes. Avec l'affirmation selon laquelle la « lumière des tubes de néons rend malade », le concept mental sur les lampes fluorescentes est relié à un concept sur la santé. Cette évaluation définit le comportement futur face à ce qui a été perçu. Elle influence aussi bien la coloration affective que le processus de reconnaissance des formes. Cela signifie également qu'elle définit par là-même le choix à opérer entre concept mental et perception look-up.

Effets non visuels

Les processus biologiques, déclenchés par des effets non visuels, sont invisibles et sont par conséquent restés longtemps inconnus. Ils se caractérisent par des rythmes

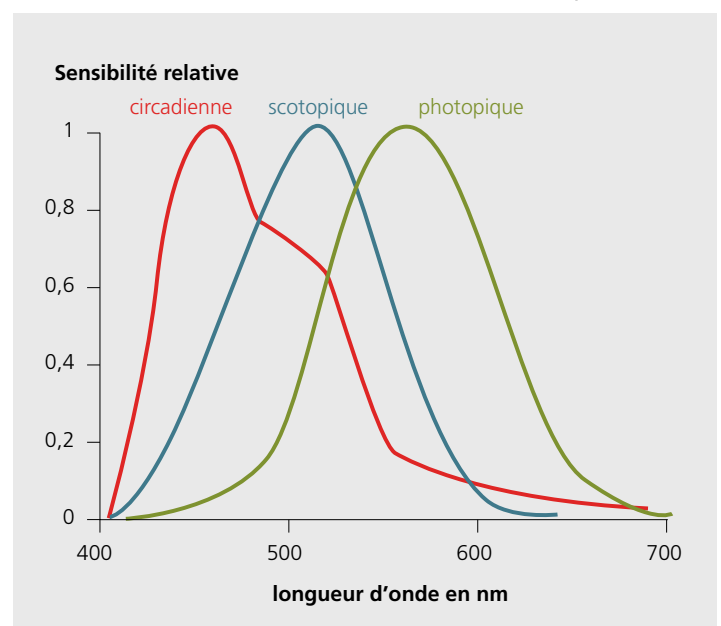
du corps (24 heures, jour-nuit, etc.), par l'attention, l'humeur, le stress et d'autres traits psychologiques descriptibles. On peut en conclure qu'il s'agit des aspects qualitatifs des installations d'éclairage relatifs à la santé. Ce n'est qu'en 2002 que David Berson, entre autres, a décrit un nouveau type de photorécepteur, découvert dans la rétine de mammifères. C'est ainsi que le mécanisme à l'origine des effets biologiques causés par la lumière et l'obscurité fut identifié en tant que nouveau photorécepteur. Cela signifie désormais que les critères de qualité de l'éclairage doivent être étendus au facteur santé.

Les termes génériques des critères de qualité peuvent être renommés comme tels :

- Tâche visuelle
- Santé
- Répartition spatiale

L'éclairage d'une tâche visuelle est soumis à d'autres critères que ceux du rythme circadien. De même, l'éclairage esthétique d'une pièce n'a pas encore prouvé qu'il remplissait d'autres critères de qualité. La cohabitation de ces termes génériques n'est en aucun cas simple et des critères supplémentaires comme l'efficacité énergétique et les intentions normatives rendent complexe une démarche d'éclairage supposée simple. Ainsi, les limites ne sont pas fixées, mais restent grandes ou-

Illustration 1.10: Courbes de sensibilité du récepteur dans l'oeil. Maximum photopique (vision de jour) à 555 nm; maximum scotopique (vision de nuit) à 507 nm; maximum circadien (non visuel) à env. 480 nm (selon les dernières connaissances scientifiques; auparavant, on admettait jusqu'à 460 nm).



vertes. Nous maîtrisons les différentes méthodes de mesure (que ce soit la luminance ou l'éclairement lumineux). Qu'en-est-il de l'évaluation? Avec le critère de qualité de l'éclairage, la lumière devrait pouvoir être évaluée plus précisément.

Les bâtonnets sont grandement responsables de l'ouverture de la pupille. Cela signifie encore une fois que la lumière ayant un pourcentage élevé de bleu fait s'ouvrir la pupille et permet ainsi plus de profondeur de champ. La lumière jaune des lampes à vapeur de sodium en revanche possède une efficacité lumineuse très élevée, mais peut ne pas activer les bâtonnets. Par conséquent, l'évaluation sur la rétine n'est pas meilleure malgré une efficacité lumineuse élevée et elle n'apparaît donc pas plus claire. Réduite à la sensibilité des bâtonnets, la fréquence de la lampe à vapeur de sodium agit comme la nuit biologique. D'un autre côté, l'effet toxique des décharges du bleu des lampes LED sur l'œil a été plusieurs fois démontré. Dans quelles quantités et à quelle fréquence la lumière n'est pas nocive? La réponse à ces questions n'est pas encore connue. On sait que:

- La lumière peut atténuer la dépression hivernale.
- La lumière peut augmenter la durée, la profondeur et la qualité du sommeil.
- La lumière peut réguler le rythme sommeil-éveil.
- La lumière peut augmenter la productivité.
- La lumière peut améliorer la prise de poids des prématurés.
- La lumière peut influencer positivement la constance du poids ainsi que la perte de poids chez les adultes.
- L'activation du système circadien par la lumière est influencée par les cellules ganglionnaires de la rétine de l'œil.
- La lumière régule le niveau de mélatonine qui a été reconnu comme réduisant la progression du cancer du sein.
- La lumière a une influence directe sur l'activité du cortex.

L'artiste et architecte Philip Rahm est devenu un adepte de l'architecture artistique durable et globale. L'art architectural

orienté sur les facteurs des sciences naturelles, biologiques, sociales et sociétales doit se baser sur des suppositions pour pallier au manque d'explications scientifiques. Les couleurs dans les pièces symbolisent les principes des effets biologiques qui sont perceptibles au cours du sommeil, de la fatigue et de l'éveil: l'architecture devient langage. On voit alors naître des pièces comme l'hormonarium ou le mélatoninium (Illustration 1.12 et Illustration 1.13).

Human Centric Lighting

La recherche sur les effets de la lumière invisible montrait il y a dix ans déjà que l'éclairage, de nuit, supprime la production de mélatonine («hormone du sommeil») et module fortement à long terme notre rythme circadien, qui détermine également notre rythme veille-sommeil. Il était déjà clair, alors, que le type d'éclairage (en particulier l'éclairage à haute intensité et à ondes courtes) a des effets non-visuels sur l'être humain et peut donc influencer la santé de manière positive ou négative.

Aujourd'hui, il a été démontré que non seulement le spectre lumineux, mais aussi l'intensité lumineuse, le moment et la durée d'exposition à la lumière ont une influence déterminante sur les effets lumineux non-visuels.

Depuis un certain temps, la notion «Human Centric Lighting» (HCL) joue un rôle important dans l'industrie et la conception de l'éclairage. La notion «Human Centric Lighting» désigne tout type de lumière, visuelle et non-visuelle, qui a une incidence sur le bien-être, la capacité de travail et la santé des personnes. La conception de l'éclairage basée sur le HCL est généralement admise comme une utilisation de systèmes d'éclairage artificiel qui modifient principalement la couleur de la lumière en fonction d'une courbe de contrôle prédéfinie de la lumière naturelle. L'utilisation délibérée de la lumière du jour et la possibilité d'intervention de l'utilisateur dans le système d'automatisation de l'éclairage ne sont généralement pas prises en compte. Actuellement, l'accent est moins porté sur une approche axée sur la préservation de la

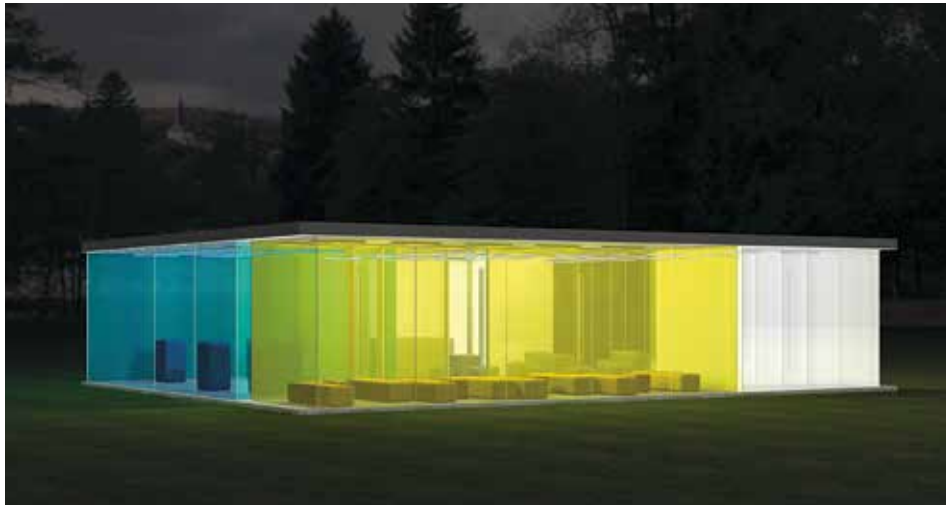


Illustration 1.11:
Café Split Time de
Philip Rahm 2007.



Illustration 1.12:
Hormonarium de
Décosterd & Rahm,
2000.



Illustration 1.13:
Pièce de mélatonine
de Décosterd &
Rahm, 2000.

santé que sur la prévention des risques, ce qui vise à prévenir les perturbations à long terme des processus circadiens, par exemple pour les équipes de nuit qui travaillent en alternance. Ces perturbations sont renforcées par une lumière vive et sont considérées comme dangereuses pour la santé par les experts médicaux. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, on s'efforce avec raison de définir au moins la couleur de la lumière dans le travail en équipe à 4100 K comme limite supérieure. Il est certain que la lumière peut augmenter de façon marquée la vigilance, la mémoire et l'attention et modifier certains paramètres physiologiques spécifiques (par exemple, la libération de mélatonine la nuit ou de cortisol le matin). Depuis des millénaires, l'homme a établi des liens symbiotiques avec le rythme jour-nuit et la lumière du soleil. L'effet chronobiologique de la lumière s'observe principalement tôt le matin et le soir au crépuscule.

Circadien

Le terme «circadien» est composé des mots latins «circa» et «dies», qui signifient «environ un jour». Ce terme technique tiré de la chronobiologie fait référence au rythme biologique des processus physiologiques pendant «environ un jour», soit 24 heures. L'accent est porté en particulier sur le rythme de la tension artérielle, l'activité cérébrale, la production d'hormones, la température corporelle, le pouls et le sommeil.

La lumière peut influencer les processus physiologiques dont les différentes phases peuvent être décalées, les niveaux d'amplitude rétrécis ou rallongés. Une lumière claire le matin a un effet positif sur l'humeur. La vue a toujours un impact instantané sur notre état et notre comportement momentané. C'est pourquoi il est difficilement possible de faire une séparation entre les effets lumineux visuels et non-visuels. Plus clairement, la description des effets non-visuels de manière durable est loin d'être aisée, ceux-ci pouvant se manifester par une exposition de plusieurs heures ou en plusieurs fois et ne sont pas directement liés à la perception visuelle de l'information. A ce sujet, il y a des indices clairs, qui sont les éléments pertinents suivants:

- L'exposition à la lumière lors des précédentes heures: plus une personne aura été privée de lumière, plus sa sensibilité instantanée à la lumière est élevée.
- La durée d'exposition à la lumière du jour, par rapport à la durée de sommeil individuelle: selon la phase circadienne de la personne, la lumière a divers effets sur l'humeur, la cognition et le comportement.
- L'intensité du rayonnement (pondérée différemment selon la sensibilité spectrale des cinq photorécepteurs rétiniens), qui définit la future exposition à la lumière de manière précise et effective.
- La durée d'exposition à la lumière.

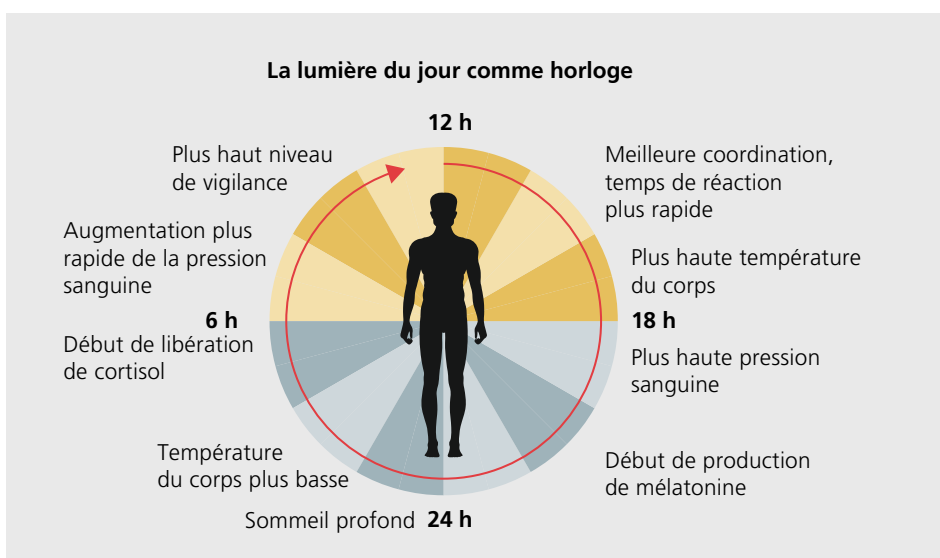


Illustration 1.14:
Le rythme circadien.

Application dans la planification de l'éclairage

Les connaissances scientifiques se résument en quatre recommandations:

- L'utilisation de la lumière du jour par la géométrie du bâtiment et les systèmes d'éclairage naturel, comme par exemple les systèmes à lamelles orientées ou les puits de lumière: par une bonne application, il est possible d'amener beaucoup de lumière du jour dans un espace, sans inconvénient visuel ou thermique pour les personnes.

- Utilisation complémentaire de systèmes d'éclairage artificiel de haute qualité: par manque de lumière du jour, ces systèmes permettent des changements d'intensité, de couleur et de distribution lumineuse. La lumière artificielle doit idéalement s'adapter aux surfaces de la pièce.

- Systèmes de détection, au moins pour détecter la présence ou l'activité de personnes et la quantité de lumière dans des zones spécifiques de la pièce: les capteurs fournissent les données pour une activation de la lumière artificielle contrôlée et économe en énergie, dans le but d'assurer un fonctionnement continu par une utilisation simple et conviviale.

- Interfaces utilisateur faciles à utiliser: Ceux-ci permettent à l'utilisateur final d'allumer et d'éteindre le système d'éclairage artificiel, de le varier, de rappeler des scènes prédéfinies et de contrôler manuellement l'apport en lumière naturelle.

Perturbations du rythme circadien

Les décalages réguliers des phases de veille et de sommeil provoqués, par exemple, par un travail de nuit, peuvent avoir un effet négatif sur la santé et provoquer des maladies. Cela se reflète dans la nécessité d'une durée normale de temps de veille et de sommeil, qui s'ajuste au rythme naturel et satisfait les cycles clairs et sombres du globe terrestre.

Les risques de la lumière bleue

Afin d'élever l'attention et rendre possible un rythme circadien normal durant le jour, nous recommandons une lumière qui présente ambiance lumineuse avec une haute intensité de bleu. Le soir, cependant, pour favoriser le sommeil, l'ambiance lumineuse doit être pauvre en intensité de lumière bleue.

La lumière bleue se divise en deux catégories selon sa longueur d'onde: la lumière à ondes courtes (de 415 à 455 nanomètres) et longues (de 456 à 490 nanomètres). La lumière bleue à ondes courtes est considérée comme «mauvaise lumière bleue». Elle est dommageable pour les yeux, car elle contribue à la fatigue oculaire et à la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge). A l'inverse, la lumière bleue à ondes longues est considérée comme «bonne lumière bleue». Il est recommandé d'installer des luminaires autant que possible avec une «bonne lumière bleue», pour augmenter l'attention et rendre possible le rythme circadien. Un modèle théorique de source LED, avec une longueur d'onde bleue de 464 nanomètres, devrait être proposé comme source lumineuse qualifiée de

*Illustration 1.15:
La lumière du jour
comme horloge
principale. (Source:
Zumtobel)*



«bonne lumière bleue». Le concept ressemble à la fonction Night-Schift d'Apple, la technologie SoftBlue de Philips sur le moniteur LCD ou aux lentilles Crizal Pre-vencia d'Essilor pour la fabrication de lunettes.

Groupes de risque pour la lumière bleue

La norme DIN EN 62471 définit pour les lampes et luminaires, les différents groupes de risque suivants:

- **Sans risque (groupe de risque 0 – GR 0):** Les sources lumineuses ou les luminaires ne présentent aucun risque photobiologique.
- **Risque faible (groupe de risque 1 – GR 1):** Les sources lumineuses ou les luminaires ne présentent aucun risque lors d'une utilisation normale.
- **Risque modéré (groupe de risque 2 – GR 2):** La lampe ou le luminaire ne présente pas de danger en raison des réactions indésirables des sources de lumière vive ou de l'inconfort thermique.
- **Risque élevé (groupe de risque 3 – GR 3):** Les sources lumineuses ou les luminaires présentent un risque, même lors d'une exposition temporaire ou passagère.

La plupart des sources lumineuses et des luminaires LED proposés dans le commerce font partie du groupe de risque 1 (GR1). La déclaration des produits n'est pas nécessaire, car les dommages causés par la lumière bleue des produits d'éclairage du marché sont inoffensifs.

Interruption du rythme circadien

Les yeux, qui sont exposés le soir à une lumière claire contenant une grande part de longueurs d'onde bleue, influencent la production de mélatonine, ce qui retarde le cycle du sommeil puis interrompt le rythme circadien. Les interférences avec le rythme circadien du corps peuvent conduire à des problèmes de santé et affecter l'humeur et les fonctions cognitives.

Phototoxicité pour la rétine

L'énergie de la lumière est absorbée par les yeux et peut simultanément endommager la rétine. Plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie est élevée. Ainsi la lumière à ondes courtes comme la lumière bleue peut provoquer plus de dommages que toutes les autres couleurs. Ce phénomène est décrit comme dégât photo-thermique. En outre, la lumière bleue peut également causer aux yeux un dommage photochimique. Les dommages photochi-

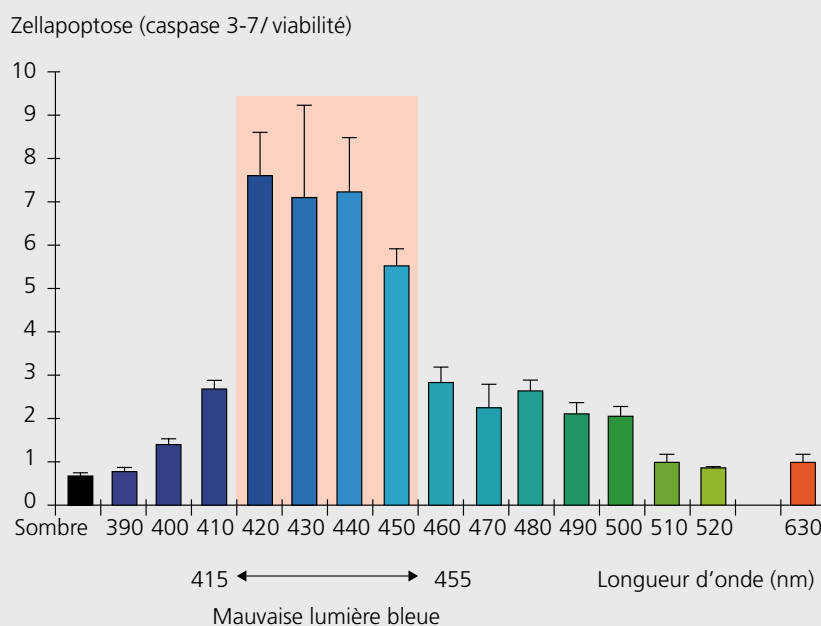
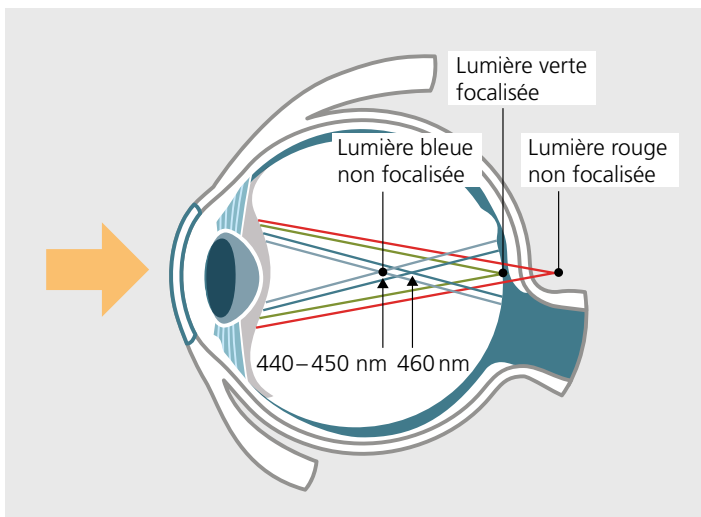


Illustration 1.16:
Phototoxicité pour
la rétine. (Source:
Paris Vision Institute
and Essilor)

miques peuvent conduire à une dégénérescence maculaire et détruire les cellules coniques de la rétine. L'illustration 1.16 montre l'impact que peut avoir la lumière bleue, ayant une longueur d'onde de 415 à 455 nanomètres, sur la dégénérescence maculaire, ce qui est la principale cause de la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge). Une longueur d'onde lumineuse bleue de 464 nanomètres peut diminuer l'impact sur la dégénérescence maculaire d'environ 1,2 fois, voire 1,9 fois, en comparaison avec une longueur d'onde de 440 à 450 nanomètres (Illustration 1.17).

Les éléments de longueur d'onde des lumières rouges, vertes et bleues, dans le spectre perceptible, sont différents, par conséquent, leurs points de convergence sur la rétine varient. Les ondes les plus courtes des lumières bleues sont focalisées devant la rétine, ce qui provoque une vision floue (l'œil est myope avec des longueurs d'onde courtes), alors que les longueurs d'onde vertes sont focalisées sur la rétine, ce qui permet une meilleure vision (vert aux environ de 555 nm est illustré directement sur la rétine et permet une acuité visuelle parfaite). Il en résulte qu'une longueur d'onde de 464 nanomètres, ou plus, pour une lumière bleue stressera moins les muscles de l'œil pour une mise au point qu'une longueur d'onde de 440 à 450 nanomètres, ou moins, puisque son point focal est proche des photorécepteurs de la rétine.

Illustration 1.17:
Différents points focaux de la lumière verte, rouge et bleue sur la rétine.

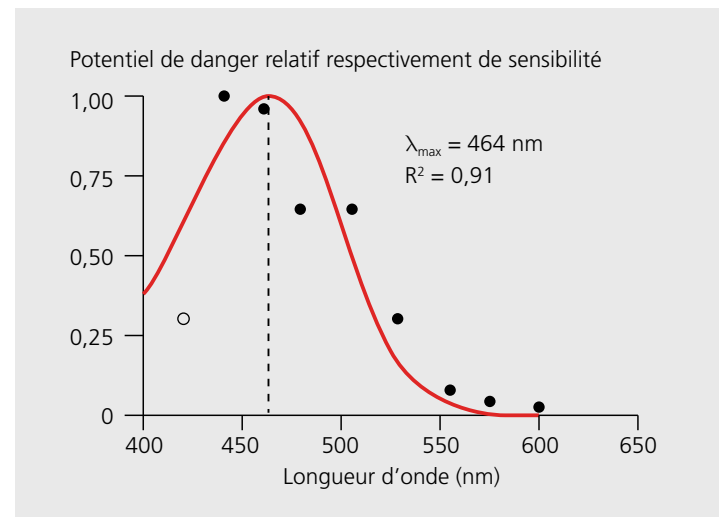


Le décalage des parties d'ondes courtes de la lumière bleue en faveur d'ondes plus longues (longueur d'onde maximale de 450 à 464 nanomètres des sources LED blanc froid de 5000 K) qui atténue la somme du spectre de luminosité de la lumière bleue à ondes courtes est désormais indispensable. Par conséquent, le spectre de luminosité de la lumière bleue à ondes longues est fortement élevé :

1. Ce pic de 464 nanomètres de longueur d'onde bleue correspond exactement au rayonnement qui est le plus sensible à l'inhibition de la mélatonine nocturne. De plus, le décalage de la longueur d'onde du pic bleu fait que la lampe LED émet plus de lumière bleue à ondes longues tombant sur la rétine. Ce sont donc 13 % de stimulation circadienne en plus qui sont générée par un niveau d'éclairage identique, comparé à une source LED qui émet une longueur d'onde maximale de 450 nanomètres.

2. La dangerosité de la lumière bleue, définie dans la norme IEC 62471, se situe entre 425 et 450 nanomètres. Pour réduire le niveau de LB (Retinal Blue Light Radiance), les sources lumineuses doivent être utilisées pour éviter d'émettre trop de lumière bleue dans cette plage de 425 à 450 nanomètres. Grâce au décalage vers une onde maximale de 464 nanomètres, la quantité de «mauvaise lumière bleue» est réduite de 73 %. Par conséquent, la Retinal Blue Light Radiance pour l'entier du

Illustration 1.18:
Sensibilité spectrale pour la suppression de la mélatonine.
(Source: Brainard et al.)



spectre de lumière bleue (415 à 490 nanomètres) peut diminuer de 20 %.

3. Ce modèle théorique de source LED proposé, n'émet que 15 % de «mauvaise lumière bleue», dans l'ensemble du spectre de la lumière bleue. Ce pourcentage représente une diminution de presque 4 fois, comparé à une source LED qui émet une onde maximale de 450 nanomètres. Ainsi, 85 % de «bonne lumière bleue» peut être gagné dans tout le spectre de la lumière bleue, pour générer plus d'attention, réguler le rythme circadien et assurer une meilleure protection des yeux (comme la DMLA et l'irritation oculaire).

Conclusion

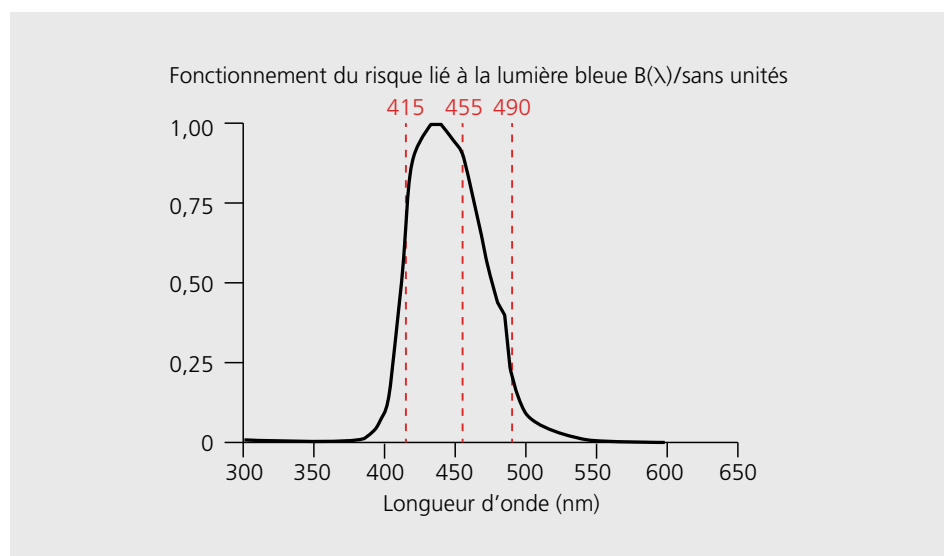
Thomas Edison a inventé l'ampoule, il y a 150 ans. Depuis, la lumière artificielle assure une plus grande présence qu'il ne devrait être, des personnes à l'intérieur des maisons. Le taux d'exposition à la lumière naturelle a considérablement changé!

De nos jours, les hommes souffrent de sous-exposition à la lumière pendant la journée et une surexposition le soir. La part de lumière bleue à l'intérieur des luminaires joue un rôle important pour maintenir l'attention au fil de la journée et rendre possible un rythme circadien normal. Afin de minimiser les risques liés à la santé des yeux, les sources LED devraient contenir le plus possible de «bonne lumière bleue».

Les aspects liés à la santé doivent aussi être en relation avec les aspects énergétiques.

Comme tout est soumis au principe de fonctionnement, la chaîne d'action, de l'émergence de la lumière à son impact sur la rétine et son interprétation, est un schéma énergétique unique, qui peut uniquement être optimisé si un ou plusieurs objectifs concordent avec qualité. De ce point de vue, il fait sens d'optimiser la qualité de diffusion d'une source lumineuse, de manière que son impact puisse également être optimisé par rapport à la qualité voulue.

*Illustration 1.19: Le graphique montre le décalage possible entre les parties d'ondes très courtes de la lumière bleue en faveur d'ondes plus longues.
(Source: Laboratoire national de physique)*



1.4 Les termes techniques de la lumière

Les termes élémentaires de l'éclairagisme (Illustration 1.20) concernent la lumière (flux lumineux et intensité lumineuse), l'éclairage (éclairage lumineux en lux) et la vision (luminance).

■ Une source lumineuse émet de la lumière dont la quantité totale est appelée flux lumineux ayant pour unité le lumen (lm). L'intensité dans une certaine direction est désignée par intensité lumineuse et a pour unité le candela (cd).

■ Lorsqu'une surface est éclairée, l'éclairage lumineux sur cette surface est mesuré et indiqué en lux (lx).

■ L'œil reçoit la lumière réfléchie la plupart du temps par un objet éclairé. L'intensité spécifique de la lumière entrant dans l'œil est mesurée et évaluée par la luminance, qui s'exprime en candela par mètre carré (cd/m²).

Intensité lumineuse (Candela, cd)

L'intensité lumineuse indique l'intensité de la lumière dans une direction donnée. Un candela correspond environ à l'intensité d'une bougie (candela signifiant bougie). La répartition spatiale des intensités lumineuses d'une source lumineuse est décrite par les courbes de répartition lumineuse. Ces courbes indiquent pour chaque «orientation» (appelé plans C) et pour chaque angle de départ (désignation de l'angle: γ = gamma) l'intensité lumineuse d'une source. Les courbes de répartition lumineuse peuvent être plus ou moins symétriques selon la source. Pour les utiliser dans des simulations par ordinateur, on sauvegarde ces intensités lumineuses dans un fichier Eulum (extension *.ldt). Un fichier de mesures contient jusqu'à 1752 valeurs, parfois même plus (Illustration 1.21).

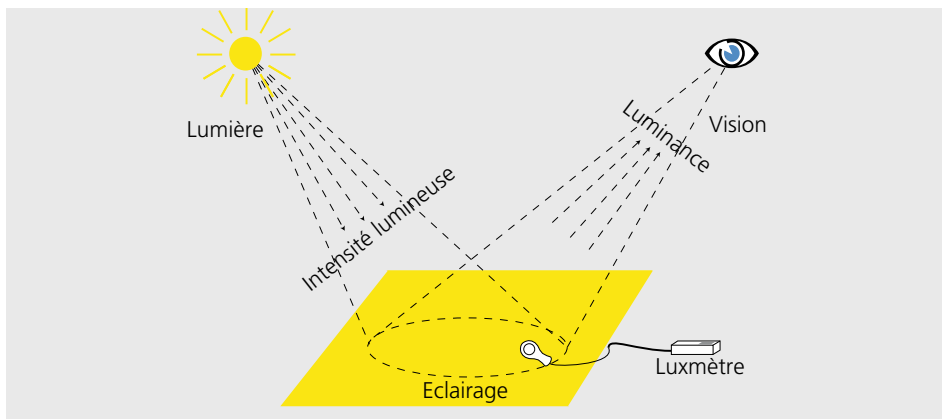


Illustration 1.20: Lumière, éclairage et vision.

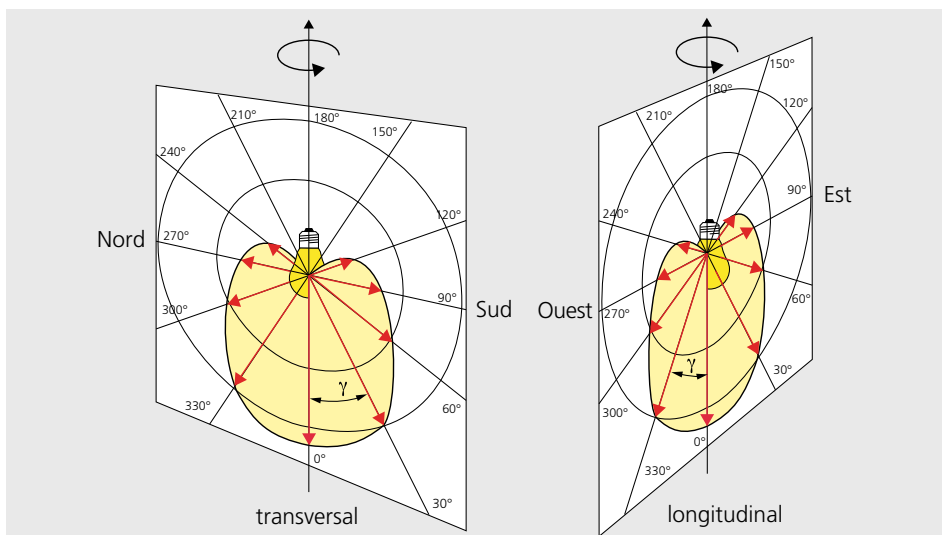


Illustration 1.21: Courbe de répartition de la lumière d'une lampe à incandescence dans le sens longitudinal et transversal.

Lorsqu'on additionne les intensités des rayons lumineux d'une source lumineuse dans toutes les directions (mathématiquement: intégrées sur l'ensemble de la pièce), on obtient le flux lumineux. La déclaration d'équivalence des spots lumineux fait en général état d'une valeur en candela (au lieu du flux lumineux en lumen, comme pour les lampes omni-rayonnantes). Cette valeur correspond à l'intensité lumineuse maximale dans la direction de rayonnement principale du spot, mais elle ne dit rien sur la quantité de lumière et sur l'efficacité énergétique de l'ampoule. Selon l'angle de rayonnement du spot, la même intensité lumineuse (nombre de candela) peut produire de grands faisceaux tout à fait différents et donc des quantités de lumière différentes (Illustration 1.22). Par angle de rayonnement d'un spot, on entend l'angle pour lequel la source lumineuse indique la moitié de l'intensité lumineuse maximale. Même en indiquant l'angle de rayonnement (p.ex. 35°), aucune indication précise sur la quantité lu-

mineuse et l'efficacité énergétique de l'ampoule ne peut être donnée. Il est par conséquent impératif pour une évaluation d'indiquer le flux lumineux total en lumen, même pour les spots lumineux.

De l'illustration 1.22 il ressort que la lumière située dans l'angle de rayonnement n'a pas la même intensité partout dans la plupart des cas. Il est également important de savoir que les spots lumineux ayant le même rayonnement peuvent générer des courbes de répartition lumineuse et donc des quantités de lumière totalement différentes. L'indication du nombre de candela et de l'angle de rayonnement (comme cela est courant pour les spots) ne dit ainsi rien sur l'efficacité de la lampe, et encore moins sur l'éclairage de l'objet.

Flux lumineux (lumen, lm)

Le flux lumineux désigne la quantité de lumière totale qui est émise à partir d'une source lumineuse dans toutes les directions. En génie énergétique, on indique la puissance d'un appareil électrique en watt.

Illustration 1.22:
Même angle de rayonnement – quantité de lumière différente.

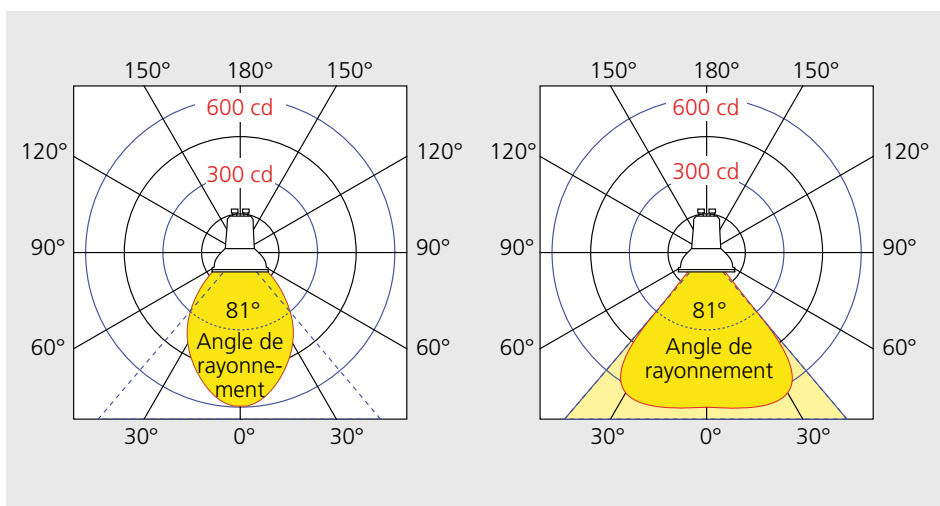


Tableau 1.2:
Intensités lumineuses de différentes sources dans la direction du faisceau principal.

Source lumineuse	Intensité lumineuse (cd)
Ver luisant	0,01
Bougie (Candela)	1
Lampe à incandescence 100 W	100
Lampe spot à LED 5 W, 120°	150
Lampe spot à LED 5 W, 36°	1 000
Lampe spot à LED 5 W, 15°	3 300
Phare	10 000 000
Soleil	$2 \cdot 10^{27}$

Comme l'œil humain ne peut pas voir de la même façon toutes les couleurs, on utilise pour la puissance d'une source lumineuse une valeur estimée sur la sensibilité spectrale de l'œil, le lumen : le jaune et le vert sont mieux perçus que le rouge et le bleu. Cette courbe de pondération de l'œil humain s'appelle la courbe V-Lambda (Illustration 1.23). Le lumen est la caractéristique normative d'une lampe. La valeur doit être indiquée sur tout emballage, par exemple «lampe halogène 42 watts: 630 lumens». L'efficacité énergétique ou l'efficacité lumineuse d'une lampe n'est donc pas indiquée en pourcentage, mais en lu-

men par watt (lm/W). Les lampes à fort pourcentage de vert ou de jaune ont une meilleure efficacité énergétique parce que l'œil humain perçoit mieux ces couleurs. C'est le cas typique des lampes au sodium dans l'éclairage de rue qui pourrait être encore plus efficace s'il était réalisé avec la lumière LED verte.

Eclairement lumineux (lux)

L'éclairement lumineux sert de mesure pour l'évaluation de la luminosité d'une surface. Lorsqu'on mesure sur une table un éclairement lumineux de 500 lux, cela signifie qu'on peut lire un texte de taille

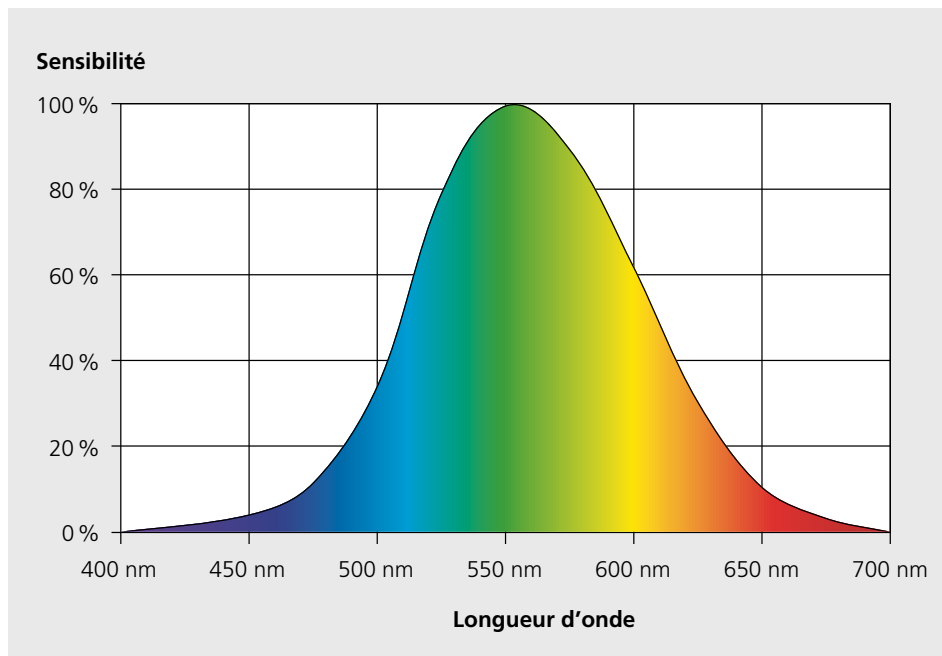


Illustration 1.23: Sensibilité de l'œil humain selon le spectre visible (courbe V-lambda).

Source lumineuse	Puissance électrique (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité lumineuse (lm/W)
Bougie domestique	–	12,5	–
Ampoule de lampe de poche	2	12,5	6
Lampe à incandescence 230 volts	60	710	12
Ampoule halogène Eco	42	630	15
Lampe économique	11	640	58
Lampe à filament LED	6	810	135
Tube fluorescent	36	3 350	93
Tube LED Retrofit	22,5	3 600	160
Lampe à vapeur de sodium sous basse pression	180	32 000	178
Soleil	–	$2,5 \cdot 10^{28}$	–

Tableau 1.3: Exemples de lampes et leur flux lumineux ainsi que leur efficacité lumineuse.

normale sans fatigue. Selon la tâche visuelle, un autre éclairage lumineux sera nécessaire. Dans un couloir, 100 lux sont suffisants, sur une table d'opération un éclairage de plusieurs fois 1000 lux sera judicieux. L'œil humain peut voir des éclairagements lumineux allant de moins d'un lux (pleine lune) jusqu'à 100 000 lux (plein soleil de midi) (Illustration 1.24, Tableau 1.4). Grâce à la pupille et à un certain temps d'adaptation, la personne s'adapte aux grandes différences de luminosité. Tout appareil photo est complètement dépassé avec ce large spectre lumineux. En comparaison avec d'autres grandeurs lumineuses, l'éclairage lumineux peut être mesuré de manière relativement simple avec un luxmètre.

Luminance (cd/m²)

La lumière absorbée par l'œil est appelée luminance, un phénomène où la taille du corps lumineux (lumière, lampe, écran ou lumière réfléchié d'un objet non lumineux lui-même) joue le rôle le plus important.

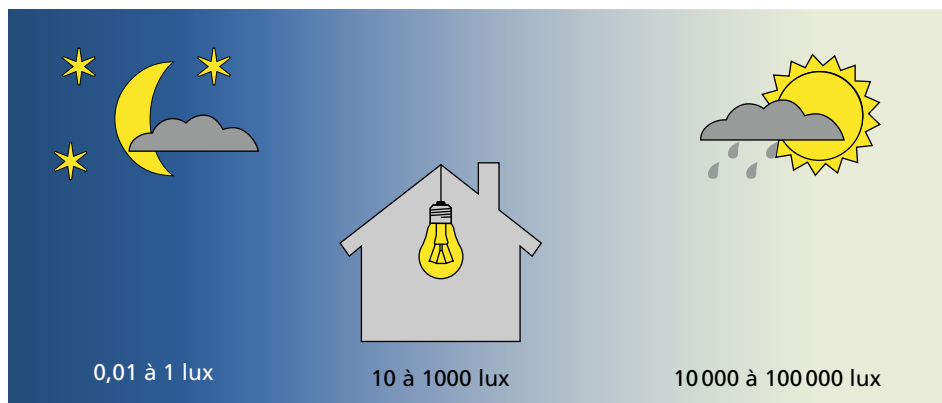
■ Un corps lumineux produit dans l'œil une très haute luminance lorsque l'intensité lumineuse et la surface éclairée sont grandes.

■ Une luminance élevée peut également être obtenue avec une grande intensité lumineuse et une surface éclairée relativement petite, par exemple la lumière d'une lampe à incandescence claire.

■ Si la surface éclairée est grossie par un diffuseur, la luminance baisse de manière significative, par exemple la lumière d'une lampe à incandescence mate.

La luminance est utilisée pour évaluer la luminosité des surfaces éclairées. Pour cela, l'intensité d'une source lumineuse dirigée dans la direction d'un observateur est divisée par la taille de la surface lumineuse. Exemple: un plafonnier a un abat-jour de 0,1 m² dans l'angle de vision de l'observateur qui ne voit qu'un côté du luminaire. Lorsque l'intensité lumineuse du plafonnier n'est que de 100 cd dans cette direction, alors il en résulte pour l'observateur une luminance de 1000 cd/m² sur l'abat-jour du luminaire. La luminance

Illustration 1.24:
Eclairages de sources lumineuses typiques.



Surface d'évaluation (sol, table)	Eclairage lumineux (lux)
Jour d'été sans nuage	100 000
Jour d'été sans soleil	20 000
Vitrine de bijouterie	10 000
Table d'opération	5 000
Rayons de supermarché	2 000
Eclairage de bureau	500
Salon	100
Eclairage public	20
Nuit d'hiver avec pleine lune	1
Nuit étoilée sans lune	0,01

Tableau 1.4:
Exemples d'éclairages lumineux.

permet ainsi de mesurer le niveau d'éblouissement d'une source de lumière. Selon la tâche visuelle, certaines luminances ne doivent pas être dépassées. Pour les postes de travail disposant d'écrans, l'éblouissement du luminaire du lieu de travail ne doit pas être supérieur à 1000 cd/m² afin que la personne qui se trouve devant l'ordinateur puisse travailler sans être gênée.

Rapport entre lux, lumen et candela

Si les deux conditions spéciales suivantes sont réunies, à savoir qu'une source lumineuse est éloignée d'un mètre exactement de la zone d'évaluation de 1 m² et que la quantité totale lumineuse de la source lumineuse est émise exactement sur cette surface d'évaluation, alors on a: 1 lumen = 1 lux = 1 candela (Illustration 1.25)

Par conséquent, le luxmètre permet de mesurer l'intensité lumineuse dans une direction donnée, lorsque l'appareil de mesure se trouve exactement à 1 mètre de la source lumineuse et qu'il est dirigé ver-

ticalement sur celle-ci. En relation avec l'éclairage lumineux, l'intensité lumineuse diminue avec le carré de la distance: à 2 m, l'intensité lumineuse est donc de 25 %, à 0,5 m de 400 % de la valeur à 1 m de distance.

A la condition que l'intensité lumineuse d'une source lumineuse soit uniforme dans toutes les directions de rayonnement ou que la source lumineuse diffuse la lumière dans toutes les directions de manière égale, alors:

1 candela → 12,57 lumens = surface du cercle unité (rayon 1 m) = 4 · Pi (Illustration 1.26)

1.5 Le marché de l'éclairage et le potentiel d'économie

Bilan énergétique global

En Suisse, un total de 236 térawattheures d'énergie a été consommé en 2017 et pour cela, 26,5 milliards de francs ont été déboursés. Les dépenses énergétiques sont classées par agents énergétiques: car-

Sources lumineuses	Luminance (cd/m ²)
Soleil à midi	1 600 000 000
Lampe à incandescence claire 100 W (LED de 10 watts)	10 000 000
Soleil à l'horizon	5 000 000
Lampe à incandescence mate 100 W (LED de 10 watts)	200 000
Ciel bleu	10 000
Flamme de bougie	5 000
Lune	2 500
Ecran plat	1 000
Ciel de nuit	0,001

Tableau 1.5: Sources lumineuses et leurs luminances.

Illustration 1.25: Relation entre l'éclairage lumineux (lux), le flux lumineux (lumen) et l'intensité lumineuse (candela) dans le cas d'une lumière dirigée.

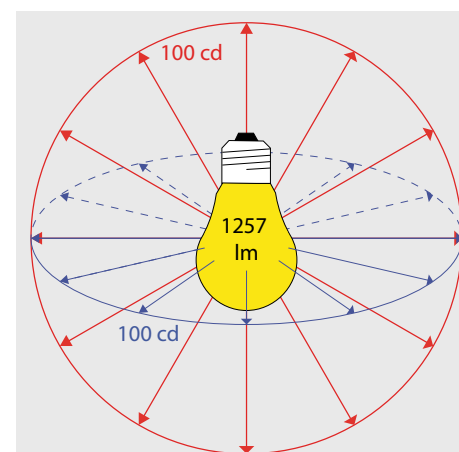
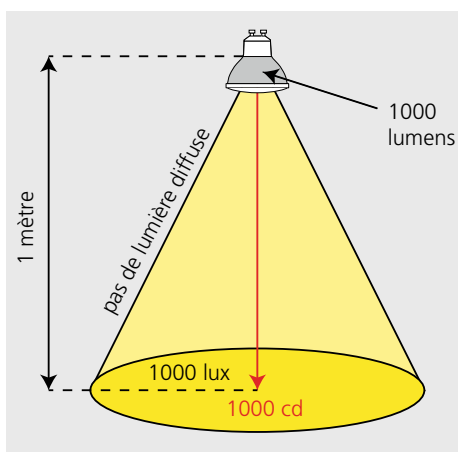


Illustration 1.26: Relation entre lumen et candela dans le cas d'une lampe à rayonnement non dirigé.

burant (essence et diesel), chaleur (mazout, gaz, bois, chauffage à distance, solaire) et électricité. Parce que l'énergie électrique est la forme énergétique la plus coûteuse, les pourcentages sont nettement différents entre la consommation et les coûts. En ce qui concerne les coûts, l'électricité, avec près de 38 %, représente clairement dans les statistiques énergétiques une part plus élevée que la consommation. Avec 40 %, les carburants perdent nettement de l'importance. Il convient de noter que plus de la moitié du prix final de l'énergie pour le diesel et l'essence est soumise à la taxe sur les huiles minérales. Les montants élevés (en millions) pour les coûts énergétiques doivent être relativisés: par personne et par an, seulement CHF 3150.– sont précisément dépensés pour l'énergie (chaleur, carburant, électricité) en Suisse. L'énergie constitue environ 4 % du produit intérieur brut.

Consommation d'énergie pour l'éclairage

La part de l'éclairage dans la consommation d'électricité totale de Suisse s'élève à 12,4 %, soit une valeur de 7200 GWh rien qu'en 2016. Il convient de différencier trois marchés de l'éclairage:

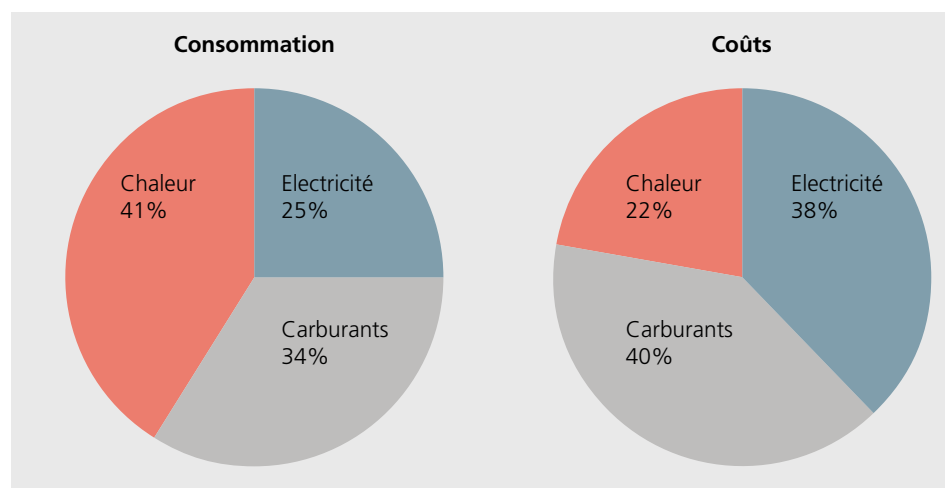
- Industrie et services: 71 %
- Éclairage domestique: 19 %
- Éclairage public: 10 %

À l'inverse de ce que l'on pourrait penser, les ménages et l'éclairage public consomment relativement peu d'énergie. La princi-

pale quantité revient à l'industrie et aux entreprises de services (bureaux, écoles, vente, hôpitaux, etc.), le secteur de la vente représentant à lui seul environ un tiers de ce total. Le tournant technologique en faveur des LED renferme un énorme potentiel d'économie: les experts considèrent que grâce au remplacement successif d'anciens moyens d'éclairage (notamment les lampes fluorescentes et halogènes) par des LED et à l'utilisation d'une régulation appropriée de la lumière, la part de consommation liée à l'éclairage sera diminuée par deux d'ici à 2025. Cela permettra d'économiser jusqu'à 6 % de la totalité de la consommation électrique en Suisse – soit la moitié de la production d'énergie de la centrale nucléaire de Gösgen.

Des produits de substitution LED sont aujourd'hui disponibles pour presque toutes les applications d'éclairage. Dans les nouvelles installations, on note toutefois une grande disparité entre les applications professionnelles (services et industrie) et les applications destinées aux ménages et aux petites entreprises: tandis que la plupart des éclairages professionnels sont équipés de LED, une nouvelle lampe sur deux est encore une lampe halogène dans les ménages et les petites entreprises. Aucun autre secteur de consommation d'énergie ne permet d'atteindre actuellement une aussi bonne efficacité énergétique que celui de l'éclairage. En 2016, à peine 16 % de toutes les installations d'éclairage étaient équipées de LED. La diminution de la consommation électrique globale en

Illustration 1.27: Part des sources énergétiques à la consommation d'énergie globale de 236 TWh/a (à gauche) et aux coûts de l'énergie globaux de CHF 26,5 Mia. (à droite) pour l'année 2017.



Suisse pourrait donc principalement dépendre du succès du secteur de l'éclairage. De telles économies ne vont malgré tout pas de soi. Les nombreuses possibilités de la technologie LED suscitent également de nouvelles convoitises. Les façades et penderies éclairées sont de plus en plus fréquentes, ce qui induit un effet de rebond. C'est pourquoi il convient de réfléchir à la manière de contrer cet effet de rebond.

Statistique du marché

L'association Suisse pour l'éclairage (SLG) détermine chaque année, tous les chiffres relatifs au marché de l'éclairage, pour le compte de l'Office fédéral de l'Énergie (OFEN). A partir de là, les tendances de l'évolution technologique, ainsi que l'évolution de la consommation en énergie pour l'éclairage sont estimées et évaluées. Le chiffre d'affaires total du domaine de l'éclairage totalise, selon l'étude, environ CHF 1,1 milliards par an. Malgré une importante évolution technologique des luminaires LED ces dernières années, le renouvellement global n'a quasiment pas changé. Dans le domaine de l'éclairage intérieur, environ 70 % a été réalisé. Les 30 % restant est représenté par les éclairages extérieurs et les remplacements de sources lumineuses. Le chiffre d'affaires de l'industrie de l'éclairage correspond approximativement aux dépenses énergétiques des consommateurs d'électricité pour l'éclairage, qui s'élèvent à environ CHF 1,2 milliard. Dans pratiquement aucun autre secteur de l'industrie, les coûts

de l'électricité ne sont susceptibles d'être aussi proches du chiffre d'affaires. Environ la moitié des produits du secteur B2B (Business to Business) sont livrés directement par les fabricants aux clients (généralement des constructeurs professionnels). Un quart des luminaires et des lampes sont vendus indirectement par les fabricants aux consommateurs finaux par l'intermédiaire de détaillants, et un autre quart sont vendus par l'intermédiaire de petits et grands magasins ainsi que des centres commerciaux (Retail, commerce de détail). La tendance envers les luminaires LED est claire depuis quelques années. Mais il existe de nettes différences entre les 3 marchés de l'éclairage domestique, prestations de service/industrie et éclairage extérieur.

Le secteur domestique sera certainement déterminé par le changement des ampoules (sources lumineuses) dans les luminaires existants (lampes, boîtiers, réflecteurs et électronique), la part des luminaires fabriqués avec des LED fixes est encore relativement faible. Un regard sur les statistiques de vente de lampes (Illustration 1.29), montre qu'entre 2014 et 2017, la part des lampes LED est passée de 11 % à 28 % et que les lampes à basse consommation ont pratiquement disparu du marché. Mais les lampes halogènes sont toujours dominantes, représentant 38 % de toutes les lampes vendues en 2017. Avec l'interdiction des lampes halogènes introduite en septembre 2018, la tendance LED devrait s'accroître fortement à partir de 2019.

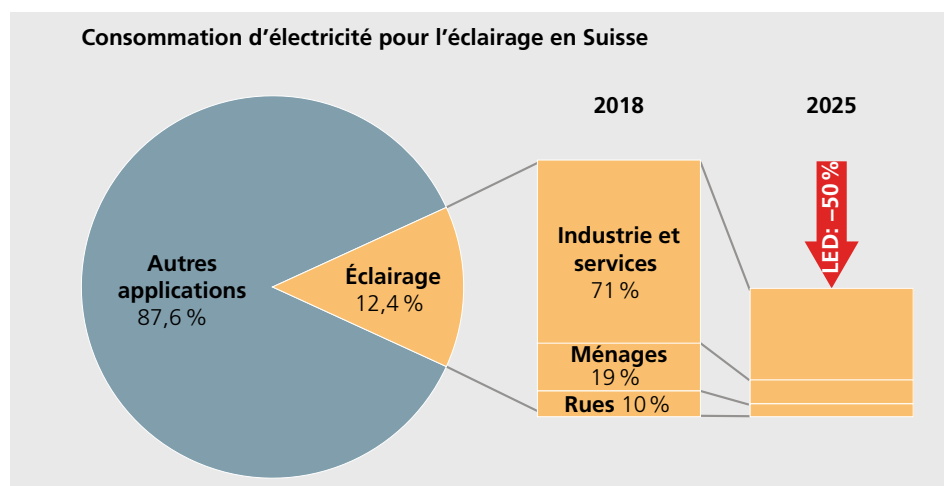


Illustration 1.28: Part des catégories de consommateurs dans la consommation globale pour l'éclairage, respectivement pour la consommation totale d'électricité de 58 TWh (2017/2018). Par conséquent, la consommation a un coût de CHF 10 Mia.

Dans l'ensemble, la vente des lampes a fortement chuté. Ceci en raison d'une durée de vie nettement plus longue des lampes (une lampe LED dure 10 à 20 fois plus qu'une lampe halogène) et non pas avec un recul du nombre des points lumineux. En d'autres termes, on peut dire que les ampoules halogènes, les lampes LED (principalement des Retrofit avec culot pour lampes halogènes) et les lampes à économie d'énergie sont principalement utilisées dans le secteur domestique et, en partie, dans les petites entreprises, tandis que les lampes fluorescentes, entre autres, sont utilisées dans les services, l'industrie et l'éclairage extérieur. L'évolution des lampes LED dans les statistiques sur les sources lumineuses est donc un bon indicateur de la pénétration des LED dans le secteur domestique.

La tendance des LED dans les secteurs des services/industrie et de l'éclairage extérieur est beaucoup plus forte que dans les ménages. L'illustration 1.30 montre que la part des LED dans les nouvelles installations dans les bâtiments de service et industriels est passée de 34% à 72% entre 2014 et 2017. L'image est similaire pour l'éclairage extérieur. Dans ces secteurs, les sources existantes (principalement des tubes fluorescents) sont généralement remplacées par des lampes LED intégrant des modules LED fixes; dans certains cas, seul les tubes des lampes existantes sont remplacés par des tubes Retrofit LED. Les luminaires LED sont généralement utilisés pour les nouvelles installations.

Illustration 1.29:
Evolution du chiffre d'affaires par type de sources entre 2014 et 2017.

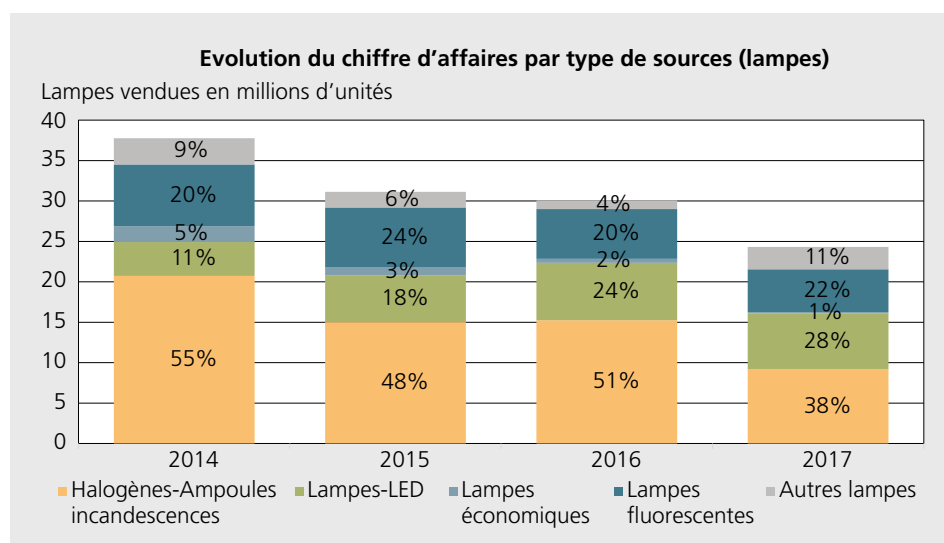
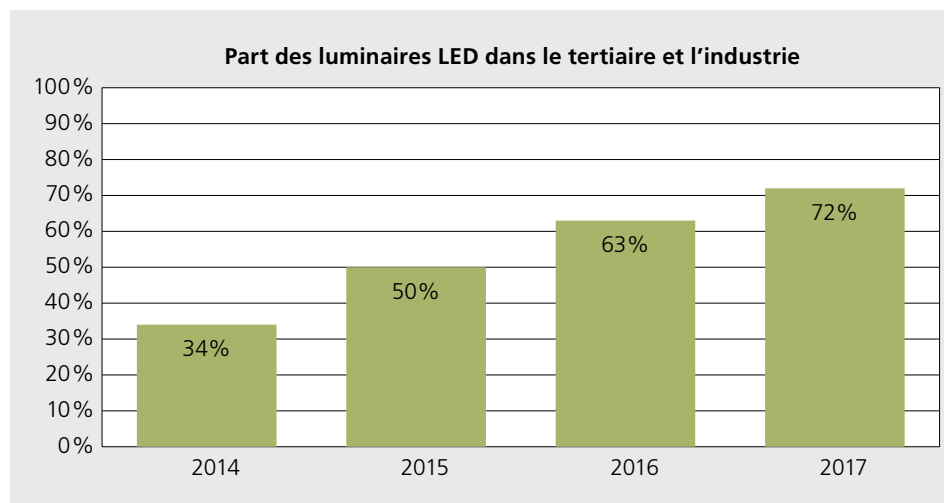


Illustration 1.30:
Evolution du chiffre d'affaires des luminaires LED dans le secteur tertiaire et industriel entre 2014 et 2017.



Evaluation énergétique

2.1 L'étiquette-énergie

L'étiquette-énergie est une déclaration européenne pour divers consommateurs d'énergie. Elle range la consommation d'énergie en 7 classes d'efficacité où la lettre «A» correspond à la meilleure classe et la lettre «G» à la moins efficace. Par ailleurs, suivant le type de consommateur, d'autres caractéristiques techniques doivent être indiquées. L'étiquette-énergie doit être placée de manière bien visible au point de vente et être en évidence dans les documents de vente.

L'étiquette-énergie a été développée dans les années 1990 pour les appareils ménagers: machine à laver, sèche-linge, lave-vaisselle, appareils de réfrigération et de congélation. Ces appareils sont également appelés «produits blancs». Plus tard ont suivi les lampes, les voitures, les bâtiments, les machines à café et les téléviseurs. La classe D désigne la moyenne de la gamme de consommation au moment de l'introduction de l'étiquette-énergie.

Les produits blancs sont étiquetés de cette façon depuis plus de 20 ans. Depuis, la consommation énergétique des appareils proposés a beaucoup changé. Aujourd'hui, pratiquement tous les appareils ménagers sont disponibles dans la classe A. Les catégories supplémentaires A+ et A++ désignent aujourd'hui les meilleurs appareils. Si le consommateur est insuffisamment informé et qu'il se décide uniquement sur la base de l'étiquette colorée, il fera le mauvais choix. En effet, un réfrigérateur de catégorie A n'est pas particulièrement économe en énergie. Le coup d'œil rapidement jeté sur l'étiquette-énergie est trompeur, pour les lampes également.

L'étiquette-énergie pour les sources lumineuses

Grâce à l'évolution technologique des LED, l'efficacité énergétique des sources lumineuses a considérablement changé. Comme pour les appareils ménagers, les nouvelles classes A+ et A++, ont créé des

possibilités d'étiquetage supplémentaires pour distinguer les meilleures sources lumineuses (Illustration 2.1).

La mise en place de l'étiquette-énergie est définie dans le règlement européen Nr. 874/2012 (l'étiquetage énergétique des lampes électriques et des luminaires). Ce règlement fixe les exigences relatives au marquage des lampes électriques et à la fourniture d'informations complémentaires sur les lampes électriques, par exemple pour:

- ampoules
- tubes fluorescents
- lampes à décharge à haute pression
- sources et modules LED.

Certains produits sont dispensés d'un étiquetage obligatoire, comme les très petites lampes, les ampoules fonctionnant sur piles, les lampes de signalisation et celles qui ne sont pas adaptées à des fins d'éclairage.

En outre, le règlement définit un étiquetage obligatoire pour les sources lumineuses exposées dans un point de vente. Quoi qu'il en soit, l'étiquette ne va pas évaluer l'efficacité des écrans fluorescents, mais seulement indiquer pour quel luminaire la source est adéquate. Comme la plupart des différents types de sources lumineuses peuvent être installés dans un luminaire, l'étiquette n'est pas très utile.

Lampes types et classes d'efficacité

Comme efficacité énergétique d'une lampe, on utilise le rapport de la quantité de lumière diffusée par la lampe (lumen) et de la puissance électrique absorbée (watt). L'efficacité énergétique des lampes s'exprime en lumen par watt. En fonction de la puissance électrique, une classe d'efficacité sera attribuée à une valeur donnée en lumen par watt. Plus la puissance est basse, plus l'exigence est faible. La courbe des besoins n'est pas linéaire: plus la puissance est haute, plus l'exigence est sévère. Le tableau 2.1 donne des exemples ty-

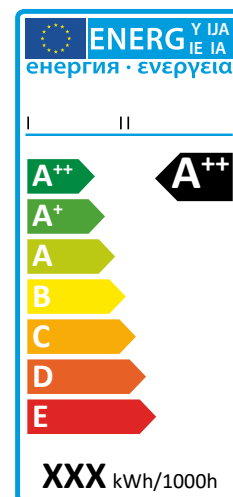


Illustration 2.1: L'étiquette-énergie européenne; exemple pour les sources lumineuses.

piques de lampes à usage domestique non dirigées avec des informations sur la classe de rendement, la puissance, le flux lumineux et l'efficacité énergétique. Les classes C et D sont formellement interdites depuis septembre 2018; il existe cependant quelques exceptions (p. ex. les lampes voltage bas, les lampes de poche ou les lampes-tige à voltage élevé). La classe E (l'ampoule classique) n'est plus autorisée depuis 2012. A souligner:

■ La différence de rendement entre la meilleure source lumineuse (tubes LED) et la plus mauvaise (ampoule) représente le facteur 13.

■ La classe B comprend un très bon rendement: pourtant le tube fluorescent compact avec 69 lm/W comme la lampe halogène basse tension, 3 fois moins efficace, figurent dans la classe B. Ceci parce que le législateur n'autorise, depuis septembre 2017, que la classe B et supérieure, mais veut exempter certaines lampes halogènes de l'interdiction.

■ La lampe économique, malgré une moins grande efficacité que les tubes fluorescents compacts, est située dans la classe A – elle a un statut particulier, puisqu'on a voulu la mettre à niveau avant le boom des LED. Entre-temps, la lampe économique a pratiquement disparu du marché – la LED l'ayant largement remplacée.

L'illustration 2.2 montre les plages de rendement des différentes classes sous la forme d'un diagramme de la puissance du flux lumineux. Exemple: une lampe non

dirigée de 10 watts de puissance absorbée et 1050 lumens de flux lumineux est situé en classe A.

La classification pour les lampes à réflecteur diverge de celle pour les lampes non dirigées: les exigences sont généralement moindres. L'illustration 2.3 montre les classes d'efficacité sous forme de diagramme de puissance du flux lumineux. Exemple: une lampe à réflecteur, de puissance absorbée et 1050 lumens de flux lumineux, se trouve dans la classe A++.

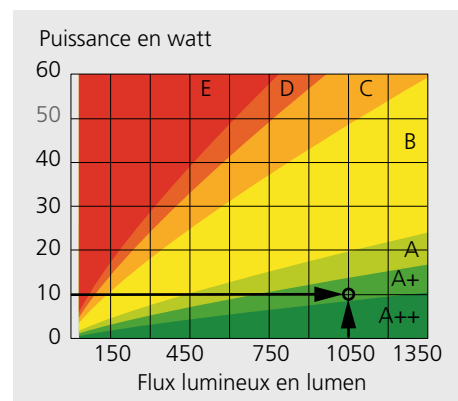


Illustration 2.2: Classe d'efficacité en fonction de la puissance et du flux lumineux pour les lampes non dirigées.

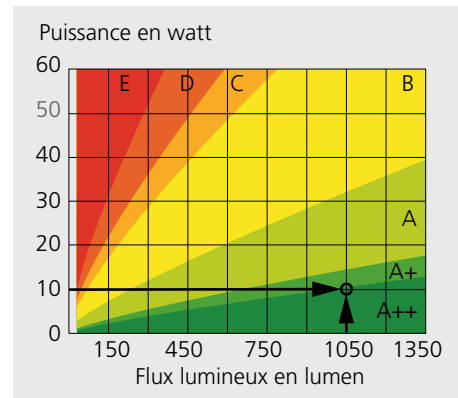


Illustration 2.3: Classe d'efficacité selon la puissance et le flux lumineux pour les lampes à réflecteur.

Classe	Exemples de lampes	Puissance (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité (lm/W)
A++	Tube LED (150 cm)	24	3700	154
	Lampe à filament LED E27	7	806	115
A+	Lampe Standard LED E27	15	1521	101
A	Tube fluorescent (150 cm)	35	3450	99
	Lampe économique E27	11	640	58
B	Tube fluorescent compact	42	1800	69
	Meilleure lampe halogène (12 volts)	35	840	24
C	Lampe halogène	52	820	16
D	Lampe halogène	28	345	12
E	Ampoule	60	702	12

Tableau 2.1: Lampes type non dirigées et leur classe d'efficacité.

2.2 Interdiction des lampes halogènes

En 2009, l'Union Européenne a décidé d'interdire graduellement les ampoules inefficaces et les lampes halogènes. L'interdiction s'est faite en plusieurs étapes: d'abord, ce sont les lampes à haute consommation et particulièrement inefficaces qui ont été exclues du marché. Depuis septembre 2018, seules quelques lampes halogènes sélectionnées sont autorisées. Pour remplacer les lampes désormais interdites, une large palette de sources lumineuses LED adaptées au même culot sont à disposition.

Bases légales

En principe, le législateur n'interdit pas la technologie, mais fixe des exigences minimales en matière d'efficacité énergétique – dans la pratique, toutefois, ces exigences conduisent à une interdiction des lampes halogènes. Plusieurs décrets européens fixent les bases légales (lien pour le téléchargement www.eur-lex.europa.eu). La Suisse a adopté les décrets européens dans son Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique OEEE (téléchargement: www.admin.ch → recueil systématique du droit fédéral: 730.02).

- CE 244/2009: Exigences relatives aux lampes à usage domestique non dirigées
- CE 874/2012: Etiquette énergétique pour lampes et sources lumineuses
- CE 1194/2012: Exigences pour les lampes à réflecteur
- CE 1428/2015: Mise à jour des numéros 244 et 1194
- CH 730.02: Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique d'installations, de véhicules et d'appareils fabriqués en série (pour la lumière, pages 24, 25, 28, 29, 64).

Lampes halogènes interdites (depuis septembre 2018)

Toutes les lampes à voltage élevé (230 volts) avec un culot E14, E27 et GU10 ne sont plus autorisées. Pour ce type de lampes, il existe de bonnes solutions de

remplacement LED, avec très peu de différences, mais jusqu'à 10 fois moins gourmandes en électricité.

Lampes halogènes encore autorisées

Pour quelques lampes halogènes standard, il n'y a aucune possibilité de remplacement (ou de manière limitée). C'est pourquoi certaines lampes sont toujours autorisées.




Quelles lampes seront interdites ou non?


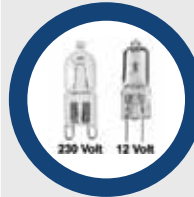

Pourquoi certaines lampes halogènes seront interdites et d'autres non? Pour la plupart des consommateurs cela manque de clarté.

■ Toutes les sources lumineuses halogènes sont à basse tension (230 volts) et n'exigent pas de transformateur. Il existe pour toutes les formes et puissances des types de substitution LED, relativement bon marché. Considérant une économie d'énergie jusqu'à 90 %, le remplacement d'une

Tableau 2.2 (en haut): Lampes halogènes plus autorisées.

Tableau 2.3 (en bas): Lampes halogènes encore autorisées.

Lampe non dirigée	Lampe à réflecteur	Lampe à réflecteur
Culot: E14, E27 (230 volts)	Culot: E14, E27 (230 volts)	Culot: GU10 (230 volts)
		
En vente jusqu'au 31.8.2019	Plus disponible depuis le 1.9.2018	Plus disponible depuis le 1.9.2018

Tiges lumineuses	Lampes à broches	Lampes à réflecteur
Culot: R7s (230 volts)	Culot: G9 (230 volts), G4 et GY6.35 (12 volts)	Culot: GU5.3 (12 volts)
		
Encore disponible	Encore disponible	Encore disponible Durée d'au moins 4000 h

lampe halogène par une lampe LED (d'une durée de vie allant de 10 à 20 ans) est amorti en quelques mois.

■ Les tiges lumineuses LED (culot de type R7s) ont presque toujours une puissance plus élevée (p. ex. 300 watts) et sont principalement utilisés pour les luminaires sur pied. Contrairement aux produits originaux, les remplacements LED proposés sont si volumineux qu'ils ne peuvent souvent pas être installés dans les luminaires sur pied existants. Les tiges lumineuses halogènes sont donc toujours autorisées.

■ Les lampes à broches sont très petites et sont souvent utilisées dans les lampes de table. Les produits de remplacement LED existent, mais n'ont souvent pas la place dans les luminaires existants pour fournir la puissance nécessaire. Les lampes à broche halogènes (230 volts et 12 volts) restent autorisées.

■ Pour les lampes à réflecteur 12 volts, il existe plusieurs produits de remplacement LED, pourtant la variante LED reste disponible – avec des exigences accrues en matière de durée de vie. Les lampes à réflecteur de petit voltage ont besoin d'un transformateur et beaucoup d'entre elles ont un variateur. Les spots halogènes de 12 volts sont toujours autorisés, parce que quelques transformateurs ou variateurs

dans les systèmes existants ne sont pas compatibles avec des sources LED (celles-ci pouvant bourdonner, scintiller ou ne pas s'allumer).

■ Un remplacement de ces lampes à réflecteur doit encore être étudié. Même si un transformateur ou gradateur existant doit être remplacé lors du passage aux LED, une haute efficacité économique est assurée, en particulier dans le secteur de la restauration et des petites entreprises.

2.3 Obligation de déclaration

Les directives EuP pour les lampes (No 244 et 1194) comporte une obligation complémentaire de déclaration des paramètres techniques importants. Les indications suivantes doivent être inscrites sur tous les emballages de lampes: puissance absorbée, flux lumineux, durée de vie, nombre de cycles de commutation, température de couleur, temps de démarrage, gradabilité, angle du faisceau (pour réflecteurs), dimensions et teneur en mercure. Les informations relayées sur Internet devront comporter d'autres indications concernant les lampes: facteur de puissance, facteur de maintien du flux lumineux, temps d'allumage, rendu des couleurs et recommandations sur l'élimination de la lampe. Grâce à l'obligation de déclaration, il est

Exigences pour les lampes LED	
Facteur de durée de vie d'une lampe	Min. 90 % après 6000 h
Maintien du flux lumineux	Min. 80 % après 6000 h
Nombre de cycles de commutation jusqu'à la défaillance	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de vie dès 30 000 h: min. 15 000 • Durée de vie au-dessous de 30 000 h: min. la moitié de la durée de vie
Temps d'allumage	Moins de 0,5 secondes
Temps de démarrage	Moins de 2 secondes
Taux de défaillance précoce	Max. 5 % après 1000 h
Rendu des couleurs (Ra)	<ul style="list-style-type: none"> • Min. 80 • Pour l'éclairage industriel et d'extérieur min. 65
Consistance des couleurs	Ecart des composants chromatiques dans l'ellipse de MacAdam, jusqu'à 6 niveaux
Facteur de puissance électrique	<ul style="list-style-type: none"> • Moins de 2 watts: aucune exigence • De 2 à 5 watts: min. 0,4 • De 5 à 25 watts: min. 0,5 • Dès 25 watts: min. 0,9

Tableau 2.4:
Exigences européennes pour les lampes LED.

possible de juger de la qualité des lampes autrement que sur leur seule efficacité énergétique. Les termes mentionnés dans la déclaration sont expliqués ci-après.

Exigences relatives aux lampes LED

En plus de l'obligation de déclaration, les lampes sont soumises à des exigences minimales. Les exigences pour les lampes LED sont listées dans le tableau 2.4.

Explications sur les exigences spécifiques

■ **Durée de vie d'une lampe:** la proportion de lampes encore pleinement fonctionnelles après 6 000 heures de fonctionnement doit être d'au moins 90 %.

■ **Maintien du flux lumineux:** le flux lumineux des lampes LED doit encore atteindre 80 % après 6000 heures. Cette exigence est très modeste: une bonne lampe LED, d'une durée de vie de 30 000 heures de fonctionnement, devrait encore présenter 96 % du flux lumineux d'origine après 6000 heures.

■ **Nombre de cycles de commutation jusqu'à la défaillance:** une lampe LED avec une durée de vie déclarée de 30 000 heures et plus, doit pouvoir être commutée (marche/arrêt) au moins 15 000 fois. A 15 000 heures, le nombre minimum de commutations est de 7500. Cette exigence se situe loin au-dessous d'une valeur pratique rationnelle: celle-ci devrait se situer au minimum à 100 000 (voire 500 000) commutations.

■ **Le temps d'allumage** désigne la durée entre l'actionnement de l'interrupteur et la première diffusion de lumière. Pour une lampe LED la durée doit être de 0.5 secondes, jusqu'à ce que la source émette de la lumière.

■ **Temps de démarrage:** durée qui suit le temps d'allumage jusqu'à ce que le rendement lumineux atteigne 60 % de sa puissance. Comme le démarrage se déroule de manière logarithmique, pour atteindre un rendement lumineux de 100 %, un multiple du temps de démarrage est nécessaire. Pour les lampes économiques, cela peut aller jusqu'à 15 minutes. Pour les lampes LED, la clarté maximale peut déjà être atteinte après moins d'une seconde.

Le nouvel emballage des ampoules



- 1 Le premier chiffre indique la **puissance absorbée** en watts, donc la quantité d'énergie consommée par l'ampoule. Le second chiffre montre à quelle ampoule classique cette puissance correspond.
- 2 Lm = lumen, indique la **puissance lumineuse**, donc la brillance d'une lampe.
- 3 Years/h (hours) = la **durée de vie** approximative en heures en en années.
- 4 K = kelvin, indique la **température de couleur**, donc si la lumière est blanc chaud, blanc neutre ou blanc froid.
- 5 Si l'ampoule contient du mercure, les informations suivantes doivent être indiquées: **Hg = Hydragryum**, indique la présence et la quantité de mercure d'une source lumineuse. Le site www.xyz.yy indique comment se débarrasser d'une lampe en cas de bris accidentel.
- 6 **Rendu des couleurs:** plus la valeur R_a est basse, plus le rendu des couleurs est mauvais, autrement dit, les couleurs des objets éclairés seront différentes qu'avec la lumière du jour (cette donnée est facultative). 60 à 80 = moyen (domaine extérieur), 80 à 90 = bon à très bon (pièce d'habitation, bureau, école), 90 à 100 = excellent (postes de graphistes, habitation).
- 7 **Intensité variable**, indique si l'ampoule peut être graduée.
- 8 **Temps de démarrage:** temps nécessaire à une ampoule pour atteindre 60 % de la valeur de la luminosité indiquée. (Pour les sources LED: 0 secondes).
- 9 **Cycles de commutation:** indiquent le nombre de fois qu'une lampe peut être allumée et éteinte. (Valeur idéale: à partir de 75 000 fois).

Illustration 2.4:
Exemple d'une déclaration de produit.

■ **Taux de défaillance précoce:** 95 % de toutes les lampes d'un certain type devraient encore brûler après 1000 heures d'utilisation. Dans la pratique, ce chiffre devrait clairement être plus élevé (99 %).

■ **Rendu des couleurs:** il indique la qualité de la lumière. L'index de rendu des couleurs est en fait une définition relativement superficielle pour définir une bonne lumière. Même avec une valeur de 80, selon le contexte de la couleur, une mauvaise impression peut être ressentie, de manière subjective. Une évaluation exacte du rendu des couleurs n'est possible qu'au travers l'examen complet du spectre des couleurs. Ce point est particulièrement important pour la technologie LED.

■ **La consistance des couleurs** signifie l'écart maximum des positions des couleurs dans un espace colorimétrique. La position d'une source lumineuse est décrite par un système de coordonnées x-y, dans le système de normalisation des couleurs de la CIE (Commission internationale de l'éclairage). En 1942, le physicien américain David Lewis MacAdam a mené des recherches intensives pour mieux évaluer la consistance des couleurs et a découvert que les distances autour d'un point de couleur pour une même perception des couleurs ne sont pas identiques, soit circulaires, mais elliptiques. Les ellipses de MacAdam – également connues sous le terme SDCM (Standard Deviation of Colour Matching) – sont donc les critères d'évaluation de la cohérence des couleurs. La valeur doit être déclarée, il n'y a pas d'exigence. Une bonne valeur: max. 3 SDCM (écart-type de la correspondance des couleurs).

■ **Facteur de puissance électrique:** Quantité électrique indiquant le rapport entre la puissance active consommée et la puissance apparente transportée. Pour les consommateurs, cette valeur a une signification moindre. Toutefois, c'est l'indicateur permettant d'évaluer la qualité technique du produit et la pollution du réseau qui y est associée. Le fait que les lampes de moins de 25 watts puissent avoir un facteur de puissance de 0,5 est douteux d'un point de vue technique et ne peut être expliqué que d'un point de vue économique.

2.4 Aperçu sur l'étiquette-énergie

La commission européenne compétente a décidé de renouveler l'étiquetage énergétique et les exigences en matière d'éclairage à partir de 2021. À l'avenir, l'étiquette énergétique aura les classifications originales A à G pour toutes les applications. Les catégories A+, A+++ et A++++ disparaîtront. L'échelle de l'étiquette-énergie sera considérablement renforcée:

- Classe A: supérieure à 210 lm/W
- Classe B: 185 à 210 lm/W
- Classe C: 160 à 185 lm/W
- Classe D: 135 à 160 lm/W
- Classe E: 110 à 135 lm/W
- Classe F: 85 à 110 lm/W
- Classe G: inférieure à 85 lm/W

Aucun produit de classe A et B n'est attendu au début de son introduction. Les meilleurs se trouvent en classe C. La Commission suppose que les classes n'auront pas besoin d'être renouvelées au cours des dix années suivantes.

Une autre innovation intéressante est la base de données accessible au public de tous les produits autorisés dans l'UE.



Illustration 2.5: La nouvelle étiquette-énergie, dès 2021.

2.5 Norme SIA 387/4

En Suisse, la SIA (Société suisse des ingénieurs et des architectes) est compétente pour les normes dans le génie civil et le bâtiment. L'une des quatre commissions normatives par secteur est la Commission pour les normes des installations et de l'énergie dans le bâtiment (KGE). La KGE dirige et coordonne toutes les normes dans ce domaine, avec entre autres la norme SIA 387/4 (L'énergie électrique dans le bâtiment – Illumination: calculs et exigences). Cette norme SIA 387/4 occupe une place spéciale dans les normes tant suisses qu'européennes. Lorsque la norme est entrée en vigueur en 1995 (alors sous l'abréviation SIA 380/4), elle n'avait pas d'équivalent dans l'ensemble de l'Europe. Cela n'a changé que 10 ans plus tard avec la mise en place de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments EPBD: Energy Performance of Buildings Directive. Le rôle précurseur de la Suisse dans ce domaine présente plusieurs avantages: tout d'abord, les pays européens sont tenus d'appliquer une norme déjà existante en Europe et de ne pas en développer d'autres. Comme la norme SIA 387/4 est née bien avant l'EPBD, elle peut continuer à être utilisée et améliorée sans porter atteinte aux conventions européennes. Ceci est un grand plus dans la question de la mise en œuvre. La procédure et le modèle de calcul de la norme SIA 387/4 sont beaucoup plus axés sur la pratique que son homologue européen, la norme EN 15193-1:2017 (Performance énergétique des bâtiments – Exigences énergétiques pour l'éclairage).

La norme SIA 387/4 concerne uniquement l'éclairage. Son contenu est basé sur la norme initiale SIA 380/4, traitant l'ensemble de l'énergie électrique utilisée dans la construction des bâtiments. Lors de sa révision en 2017, la norme SIA 380/4 a été divisée entre la norme SIA 387/4 sur l'éclairage et le cahier technique SIA 2056. Cette dernière décrit tous les aspects ne concernant pas l'éclairage, jusqu'alors intégrés dans la norme SIA 380/4: en particulier le besoin en électricité des appareils électroménagers et l'ensemble de la technique du bâtiment.

Buts et objectifs de la norme

La préface de la norme SIA 387/4 dit: «La présente norme a pour objet l'utilisation efficace de l'électricité pour l'éclairage dans le bâtiment. Elle fournit une méthode permettant de calculer et d'évaluer la demande en électricité pour l'éclairage dans les bâtiments à construire ou à transformer. Elle définit les indices de référence et le modèle standard nécessaires à la description de la demande en électricité dans le bâtiment». La norme comprend 6 chapitres:

- Domaine d'application (délimitation et références)
- Compréhension (explication des termes)
- Etude de projet (équipe de planification et démarche)
- Calcul du besoin en électricité (puissance spécifique et heures à pleine charge)
- Exigences individuelles et exigences du système
- Annexes (valeurs type et exemples)

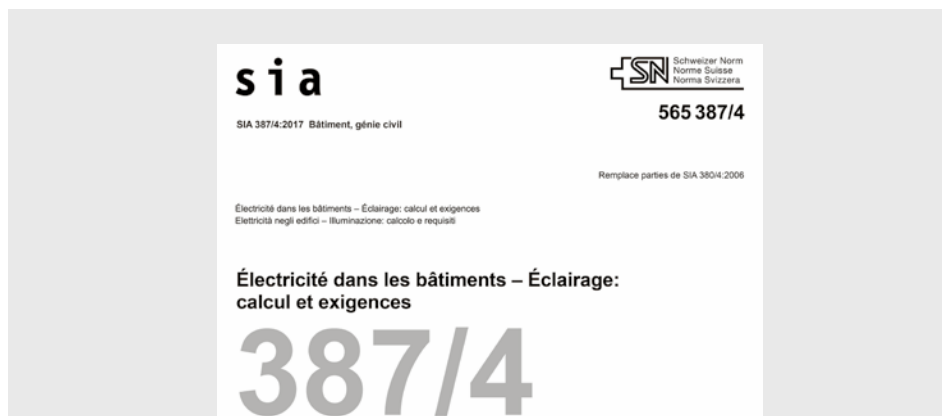


Illustration 2.6:
Extrait de la page
de garde de la
norme SIA 387/4.

Compréhension

Les termes les plus importants dans la norme SIA 387/4 sont:

■ **Consommation électrique** (MWh/an): Consommation d'énergie électrique d'un bâtiment ou d'une installation, **mesurée** sur une année.

■ **Besoin en électricité** (MWh/an): Besoin en énergie électrique d'un bâtiment, de différentes exploitations, de locaux et d'appareils installés, **calculé** pour une année.

■ **Besoin spécifique en électricité** (kWh/m²): Besoin annuel en électricité de la surface nette des bâtiments, exploitations et locaux.

■ **Indice partiel énergétique éclairage** (MJ/m²): Besoin en électricité de la surface de référence énergétique (de l'ensemble du bâtiment) (1 kWh = 3,6 MJ).

■ **Surface au sol** (m²): Surface brute y compris les murs et les surfaces de construction.

■ **Surface nette** (m²): Surface utile, pouvant être louée ou éclairée sans les murs et les surfaces de construction.

■ **Surface de référence énergétique** (m²): Somme de toutes les surfaces au sol chauffées ou climatisées dans un bâtiment. Dans les bâtiments sans parking, la surface nette est d'environ 80 % de la surface de référence énergétique.

■ **Les valeurs limites** (kWh/m²) doivent être respectées pour les nouveaux bâtiments et posées comme objectifs pour les bâtiments à transformer. En effet, elles correspondent à l'état de la technique et sont économiques.

■ **Les valeurs cibles** (kWh/m²) doivent être posées comme objectif pour les nouveaux bâtiments: elles sont obtenues en combinant de manière optimale les meilleurs produits disponibles sur le marché.

■ **Les valeurs de projet** (kWh/m²) sont les valeurs de **besoin** en énergie obtenues avec la méthode de calcul contenue dans la norme.

■ **Les valeurs de l'objet** (kWh/m²) sont des valeurs de consommation d'énergie mesurées dans le bâtiment.

■ **Exigences du système:** Exigences concernant les besoins en électricité de l'ensemble du bâtiment. Pour une évaluation effectuée à l'aide des exigences du système, la conception est libre quant à la sélection et à la combinaison des composants (lampes, luminaires, réglages, agencement de la pièce). Les installations, bonnes ou mauvaises sur le plan énergétique, peuvent se compenser par la pondération des surfaces.

■ **Exigences individuelles:** Exigences concernant les luminaires composés de sources lumineuses, du dispositif de fonctionnement et du réflecteur. Pour les exigences individuelles, il n'y a pas de possibilité de compensation. Pour les éclairages, les exigences particulières s'appliquent uniquement en relation avec les directives concernant l'éclairage lumineux (conformément à la norme SN EN-12464).

■ **Puissance électrique:** Puissance moyenne absorbée par un luminaire (y c. le dispositif de fonctionnement) en pleine charge, en fonctionnement continu pen-

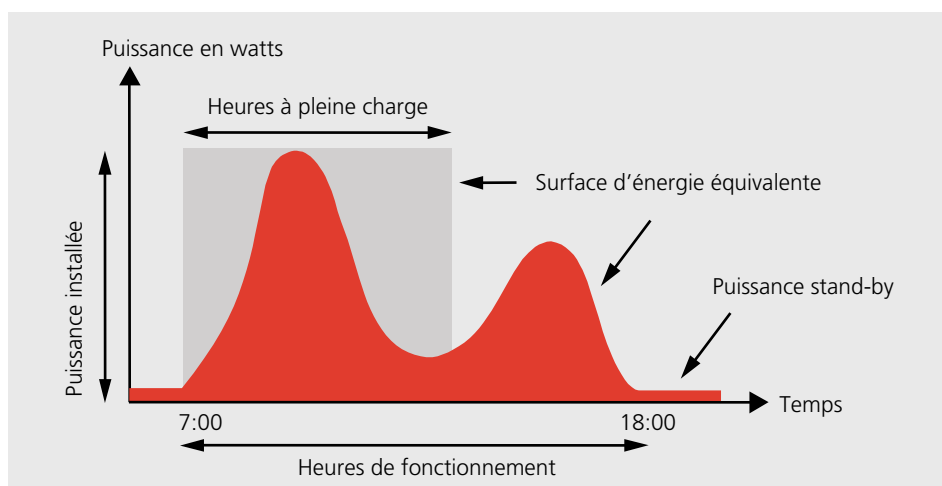


Illustration 2.7:
Définition des
heures à pleine
charge.

dant un quart d'heure. L'addition de la puissance de tous les luminaires installés dans un local, une exploitation ou dans l'ensemble d'un bâtiment définit la puissance installée. Comme il est rare que tous les luminaires fonctionnent en même temps, la puissance maximale mesurée est en général plus faible que la puissance installée.

■ **Heures à pleine charge:** Pour un luminaire seul, non graduable, le nombre d'heures à pleine charge correspond au temps de fonctionnement (Illustration 2.7). Comme tous les luminaires fonctionnent rarement en même temps, il en résulte un nombre d'heures de fonctionnement moyen, estimé sur une exploitation ou sur l'ensemble d'un bâtiment. Le nombre d'heures à pleine charge est le rapport entre le besoin énergétique et la puissance installée. Le nombre d'heures à pleine charge est donc en général plus faible que le temps de fonctionnement effectif des différents luminaires.

■ **Indice du local:** Quantifie le rapport entre la surface des murs d'un local et la surface au sol (Illustration 2.8). Plus l'indice de la pièce est élevé, moins il faut installer de lumière artificielle pour atteindre le niveau d'éclairage souhaité. Le pourcentage de murs absorbant la lumière est plus petit et les luminaires peuvent diffuser librement la lumière dans le local. La valeur de l'indice se situe dans la pratique entre 0,5 et 5.

■ **Flux lumineux (lumen):** Puissance de rayonnement d'une source lumineuse, évaluée avec la sensibilité de l'œil humain à des températures de couleur définies.

■ **Eclairage lumineux (lux):** Flux lumineux sur une surface définie, par exemple sur la surface d'une table. Dans la norme EN 12464 (Eclairage des lieux de travail dans les espaces intérieurs), des éclairages lumineux moyens (valeurs de maintenance) sont énumérés pour les différentes tâches visuelles. Les valeurs indicatives d'éclairage se trouvent au chapitre 6 de la norme EN 12464.

■ **Les valeurs indicatives d'éclairage** se trouvent au point 2.4.

■ **Valeur UGR:** facteur qui mesure l'éblouissement. Rapport entre l'éblouissement direct par des luminaires et la luminosité générale de la pièce, respectivement l'intensité lumineuse en arrière-plan. Les valeurs UGR autorisées sont indiquées dans la norme européenne EN 12464. La probabilité d'éblouissement est proportionnelle à la valeur UGR. Le procédé UGR (Unified Glare Rating) a été développé par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) pour rendre disponible dans le monde un système unifié d'évaluation de l'éblouissement. Contrairement au procédé Söllner, qui évalue l'éblouissement par les luminaires seuls, la formule UGR est conçue pour évaluer l'éblouissement d'une installation d'éclairage. La valeur UGR est une valeur spécifique à un local, elle peut également servir de paramètre pour des luminaires si on prend pour base un local standard, à savoir une pièce de dimensions 12 m/24 m/3 m (longueur, largeur, hauteur). Les valeurs du facteur d'éblouissement sont indiquées au chapitre 6 de la norme EN 12464.

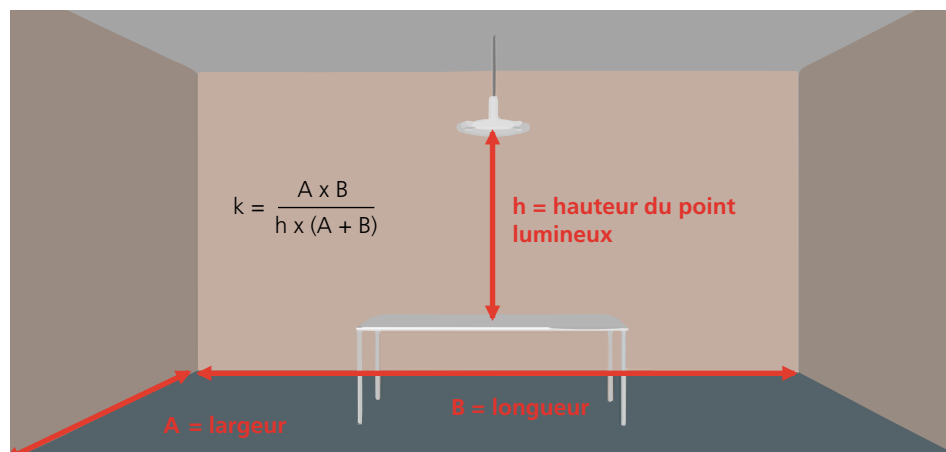


Illustration 2.8:
Définition de l'indice du local.

Collaboration des participants

La planification de l'éclairage d'un bâtiment s'effectue principalement entre le maître d'ouvrage, l'architecte, le planificateur spécialisé et le fournisseur. Tous les participants sont responsables de l'efficacité de l'installation d'éclairage. Dans la pratique, le processus de planification d'éclairage se déroule souvent en plusieurs étapes. La conséquence est que le planificateur spécialisé doit, à la fin du processus de conception, éliminer les défauts des précédentes étapes au moyen de réglages pour permettre un éclairage efficient (Illustration 2.9). La planification de l'éclairage se fait dès le début d'un projet:

■ **Maître d'ouvrage:** Il rédige des directives qui ne doivent pas être en contradiction, par exemple application du Standard Minergie pour l'éclairage et décoration des murs en velours noir. D'autres exigences de conception et de fonctionnalité ainsi qu'une pression des coûts non réaliste ne constituent pas de bonnes conditions pour un éclairage efficient.

■ **Architecte:** La luminosité du local, mais également les possibilités d'exploitation de la lumière du jour sont entre les mains de l'architecte et influencent fortement la consommation d'énergie pour un éclairage artificiel. Les points particulièrement sensibles du point de vue de l'efficacité éner-

gétique dans de nombreux projets architecturaux sont les dispositifs de protection solaire inadaptés (stores en toile au lieu de lamelles orientables) et les modèles personnalisés de luminaires qui ne sont pas idéaux en matière de technologie d'éclairage.

■ **Le planificateur spécialisé** est responsable pour le justificatif énergétique. Dans les bâtiments exigeants, il est judicieux de consulter un spécialiste de la planification de l'éclairage. Lors du choix des luminaires, il est important que le planificateur spécialisé procède à une évaluation des données techniques – non seulement en rapport avec l'efficacité, mais aussi pour une bonne répartition de la lumière et un éblouissement réduit au minimum. La régulation de l'éclairage – correctement planifiée et installée – apporte beaucoup d'avantages; cependant, il n'est pas rare que l'argent et le temps fassent défaut pour une mise en œuvre professionnelle.

■ **Fournisseur:** Outre la livraison de luminaires et de composants, il est souvent sollicité pour la planification (gratuitement). La question de savoir si la meilleure solution d'éclairage peut être réalisée sans les services d'un planificateur spécialisé doit être examinée avec soin.

■ **Le planificateur spécialisé** est la plupart du temps compétent pour établir le justificatif énergétique. Lorsque celui-ci ne

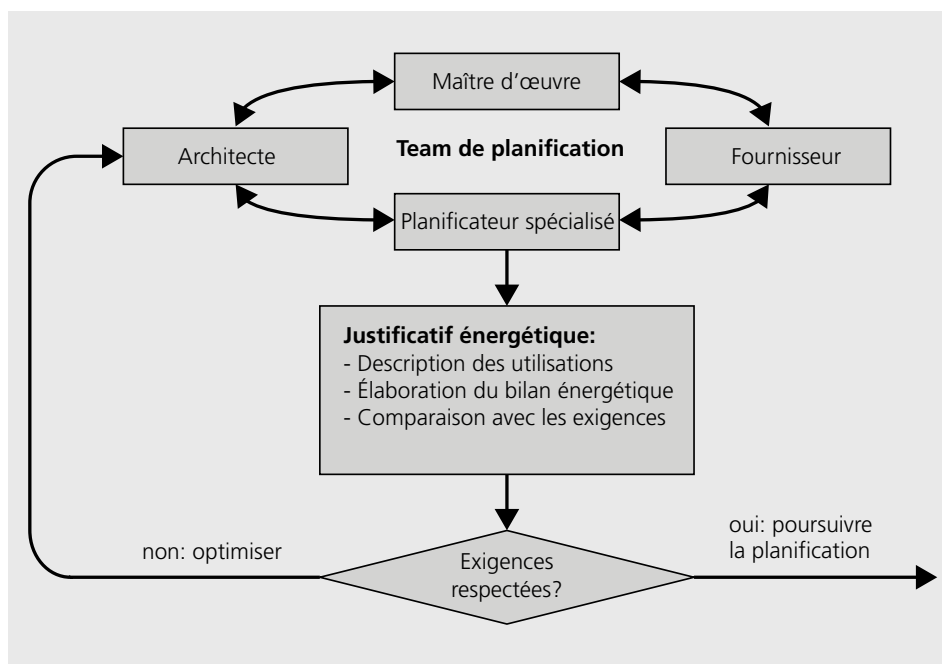


Illustration 2.9:
Collaboration optimale des intervenants au même niveau.

satisfait pas aux exigences, de simples corrections sur l'installation ne suffisent souvent pas. Seule la remise en question des souhaits du maître d'ouvrage et de la conception architecturale peut encore améliorer l'efficacité de celle-ci. Mais cela ne fonctionne qu'avec une collaboration interdisciplinaire.

Puissance installée

La puissance électrique de l'éclairage d'un espace dépend des facteurs d'influence suivants:

- Niveau d'éclairage lumineux en lux (selon EN 12464)
- Facteur de planification / facteur de maintenance
- Rendement lumineux des luminaires
- Facteur de réflexion (rendement énergétique).

L'interaction des facteurs est décrite dans l'illustration 2.10. L'unité W/m^2 résulte du fait que l'éclairage lumineux peut être indiqué en lux mais également en lm/m^2 et que l'unité $lm/watt$ est utilisée pour l'efficacité lumineuse de la lampe. Les autres chiffres ne sont pas dimensionnés. La formule est également appelée «procédé de rendement» et constitue la base pour tous les calculs lumineux, mêmes pour les simulations com-

plexes avec des programmes comme Relux (www.relux.com) ou Dialux (www.dial.de/fr/dialux).

Niveau d'éclairage

Les données concernant le niveau d'éclairage sont mentionnées dans la norme SN EN 12464 «Eclairage des lieux de travail intérieurs» pour chaque type de local (Tableau 2.13 page 46 et Tableau 7.1 page 132). Un maître d'ouvrage en Suisse peut également définir des éclairages lumineux plus élevés ou plus faibles que la norme. En Allemagne, l'éclairage lumineux minimal pour les lieux de travail est fixé dans une directive et est légalement exigé des employés. Pour les éclairages lumineux élevés, les exigences pour les utilisations standard de locaux conformément à la norme SIA 387/4 ne peuvent pas être adaptées et l'augmentation de l'éclairage lumineux doit donc être compensée par un éclairage efficient.

Facteur de planification / facteur de maintenance

Avec le facteur de planification, l'éclairage lumineux défini est augmenté pour compenser le vieillissement et le salissement de l'éclairage pendant sa durée de vie. La valeur 1,25 est établie comme valeur standard. Ce qui signifie qu'un éclairage

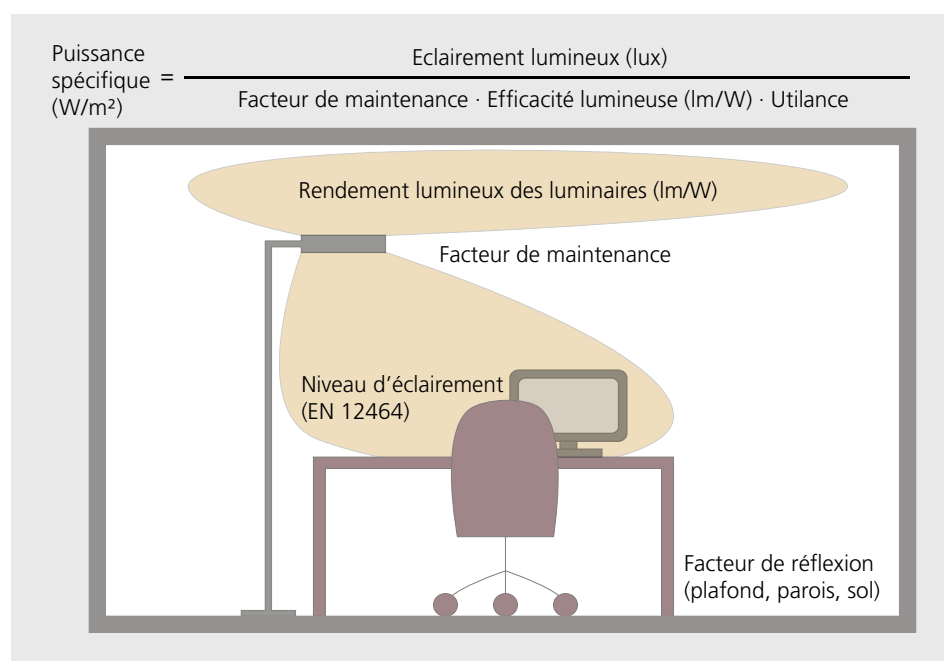


Illustration 2.10: Interaction des variables d'influence pour la puissance électrique.

ment lumineux de base (p. ex. 500 lux) est augmenté de 25 % (à 625 lux) pour garantir que l'éclairage fournisse encore 500 lux après plusieurs années de fonctionnement. Il existe également des arguments pour des facteurs de planification plus élevés, de 1,5 par exemple, car le salissement et le vieillissement seraient en réalité plus élevés. Ce à quoi il faut objecter qu'un facteur de conception augmenté de 25 % entraîne une augmentation de la consommation énergétique de 25 %, et que donc une maintenance et un entretien réguliers valent la peine. Pour les normes SIA 387/4 et Minergie, les calculs sont effectués avec un facteur de planification de 1,25. Un facteur de planification plus élevé doit être compensé par un éclairage plus efficace. Dans la pratique de l'éclairage, la valeur réciproque du facteur de planification est souvent utilisée: le facteur de maintenance. Généralement, la valeur 0,8 est utilisée pour le facteur de maintenance. Dans la formule, le facteur de maintenance est dans le dénominateur plutôt que dans le numérateur (facteur de planification).

Rendement lumineux des luminaires

Le rendement lumineux des luminaires est la mesure de l'efficacité d'un luminaire. Elle décrit la différence entre l'émission lumineuse en lumen et la puissance électrique consommée en watt. Entre la connexion électrique et le flux lumineux

émis, les pertes sont causées par l'électronique (ballasts) et le réflecteur (guidage de la lumière/antireflet), qui réduisent l'efficacité d'un luminaire. Grâce à des composants de haute qualité, ces pertes peuvent être minimisées. Selon le type de source, la catégorie des luminaires et leur puissance, les valeurs du rendement lumineux des luminaires peuvent varier fortement. Dans le tableau 2.5, les valeurs-type sont énumérées. Des luminaires à plus haute valeur de rendement sont également proposés sur le marché. En 2018, par exemple, les valeurs maximales pour les luminaires autonomes étaient de 165 lm/W. Cependant, le critère d'efficacité n'est pas le seul facteur important: il faut également tenir compte de la répartition uniforme de la lumière et d'un bon contrôle de l'éblouissement. Il est parfois judicieux de choisir un luminaire moins efficace pour obtenir un éclairage optimal.

Utilance

L'utilance d'un local dépend du matériau des surfaces environnantes et de leur couleur. Il ressort clairement du tableau 2.6 que les propriétés de réflexion, qui sont décisives pour la luminosité dans le local, sont très fortement déterminées par les matériaux. Tandis qu'une couche de peinture blanc pur reflète plus de 80 % de la lumière qui apparaît sur les murs ou le plafond, une couche rose ou bleu clair n'en reflétera que 50 %. Pour les peintures

Type de source	Type de luminaire	Puissance du système W	Flux lumineux lm	Efficacité lumineuse lm/W
LED	Lampes sur pied	90	10800	120
	Luminaires suspendus	40	4800	120
	Plafonniers	40	4800	120
	Spot encastré	20	2000	100
	Projecteur/spot	30	2400	80
	Applique	30	2400	80
	Lampe de table	10	800	80
 Tubes fluorescents	Lampes sur pied	120	9000	75
	Luminaires suspendus	60	4500	75
	Plafonniers	40	2800	70
	Spot encastré	32	1600	50
	Applique	30	2100	70
Lampe halogène	projecteur/spot	50	750	15

Tableau 2.5: Luminaires types et leur efficacité lumineuse.

sombres (p.ex. cramoisi) ou les murs en béton apparent, le facteur de réflexion descend à 20 %. Le choix des matériaux et la coloration influencent très fortement la puissance installée nécessaire pour la lumière artificielle et les possibilités d'utilisation de la lumière du jour. Les espaces peuvent être distingués plus ou moins en trois catégories (Tableau 2.7).

■ Pour le facteur de réflexion, il faut tenir compte de l'ameublement, généralement plus sombre que les murs, dans le calcul. Le facteur de réflexion est d'environ 50 % pour l'ameublement courant et les murs clairs.

■ Lorsque les murs et le plafond sont en béton brut, ou dans d'autres matériaux peu réfléchissants, la pièce est alors considérée comme sombre.

■ La propriété de réflexion du sol est moins pertinente pour l'éclairage lumineux utile.

Tableau 2.6:
Propriétés de réflexion des peintures et matériaux.

Tableau 2.7:
Degrés de réflexion des espaces entourés de locaux en relation avec la luminosité.

Peinture	Matériau	Degré de réflexion
Blanc pur	Miroir, aluminium très brillant	supérieur à 80 %
Blanc	Plâtre, aluminium éloxé	70 % à 80 %
Jaune clair	Aluminium/chrome/cuivre poli, érable, bouleau	60 % à 70 %
Blanc teinté	Panneaux de fibres de bois crème, nickel hautement poli	50 % à 60 %
Gris clair, rose, vert clair, bleu clair	Calcaire, mortier clair, crépi calcaire, marbre poli	40 % à 50 %
Gris moyen, rose, vert clair, bleu clair	Chêne clair, contreplaqué brut, grès	30 % à 40 %
Brun	Ciment, béton brut, granite	20 % à 30 %
Bleu foncé, vert foncé, rouge foncé, gris foncé	Chêne foncé poli, brique rouge, tapis sombre	10 % à 20 %
Velours (noir)		env. 1 %

Luminosité du local	Plafond	Murs	Sol
Locaux clairs	80 %	50 %	30 %
Locaux normaux	70 %	50 %	20 %
Locaux sombres	30 %	30 %	10 %

L'utilance d'un local dépend de deux autres facteurs: la taille du local (définie par l'indice du local) et la caractéristique de rayonnement des luminaires. La comparaison des deux graphiques de l'illustration 2.12 montre la grande influence de la luminosité du local et de l'orientation du rayonnement des luminaires sur l'utilance. Exemple: une pièce de dimensions 6 x 6 x 3 m possède un indice de local de 1.

■ Si le local est normalement clair et équipé de luminaires au rayonnement plongeant et direct, le local aura une utilance de plus de 80 %, c'est-à-dire que 80 % de la lumière diffusée par le luminaire agit sur la surface utile (Illustration 2.12, à gauche).

■ Si la pièce est sombre (béton brut ou matériaux similaires) et que des luminaires à rayonnement indirects sont utilisés, l'utilance sera de seulement 25 % (Illustration 2.12, à droite).

Dans les locaux sombres, des luminaires à rayonnement direct devraient être utilisés pour que l'éclairage soit relativement efficace. Dans un local plus clair, le choix des types de luminaires possibles est plus large. Une combinaison de luminaires à rayonnement direct et indirect permet également d'obtenir un éclairage efficace. Dans les locaux normalement clairs et les locaux clairs, l'utilance peut augmenter au-delà de 100 %. Un mouvement perpétuel pour l'éclairage? Non, l'utilance peut augmenter de plus de 100 % dans les locaux de grande dimension ayant des plafonds clairs, parce que ce n'est pas l'éclairage lumineux des surfaces délimitant le local qui est utilisé pour l'évaluation mais uniquement le sol (ou la surface d'une table). Dans certaines circonstances, la lumière du plafond se réfléchit sur le sol de manière si intense que l'éclairage lumineux sera plus élevé au sol qu'il ne le serait avec la seule lumière directe du luminaire. Si tout le local était utilisé comme surface d'évaluation, l'utilance ne pourrait naturellement jamais atteindre 100 %.

Les galeries marchandes souterraines de la gare centrale de Zurich offrent un objet visuel intéressant sur le thème des espaces sombres et lumineux. Lire dans le Tagesanzeiger du 28 juin 2018:

«Le centre commercial Shop-Ville sous la gare de Zürich est considéré comme le bâtiment le plus fréquenté de Suisse. Un demi-million de personnes y circulent chaque jour. Le vaste centre commercial souterrain est dominé par des conditions d'éclairage très différentes. Alors que la

galerie marchande Gessnerallee, inaugurée en 2014, et la halle Löwenstrasse brillent de mille feux, la halle Landesmuseum, inauguré en 1990, a littéralement une existence dans l'ombre – il y fait remarquablement plus sombre. L'intérieur des magasins et leurs vitrines fournissent parfois plus de lumière que les luminaires du plafond.»

Dans la nouvelle partie, cependant, pas plus de lumière a été installé, mais un design intérieur beaucoup plus lumineux a



Illustration 2.11: Espaces clairs et sombres dans les galeries marchandes de la gare de Zurich. (Photo: Urs Jaudas)

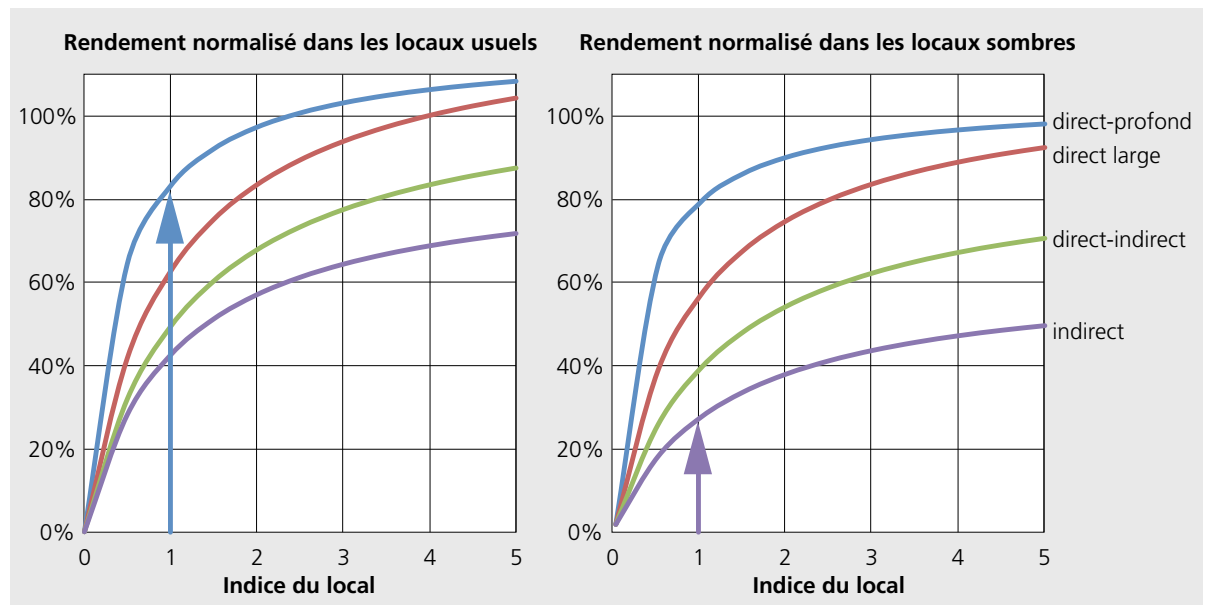


Illustration 2.12: Rendements normalisés dans un local clair et dans un local sombre.

été réalisé. L'illustration 2.11 montre de manière impressionnante les différences de luminosité entre les galeries marchandes «Museumsstrasse» et «Durchgangsbahnhof».

Exemple de calcul

La puissance installée pour un local se calcule selon l'illustration 2.10 avec la méthode de rendement. Pour donner un exemple, il faut que tous les paramètres soient les mêmes dans deux locaux de comparaison, à l'exception de la luminosité et de l'orientation de rayonnement des luminaires utilisés. Les utilisances sont indiquées sur l'illustration 2.12.

Résultat: à équipement égal avec la même efficacité de luminaires, un local sombre a besoin de trois fois plus d'énergie qu'un local clair (Tableau 2.8).

Si le local sombre est équipé de luminaires halogènes à la place de luminaires efficaces, l'exemple de comparaison est extrême, mais très courant dans la pratique (Tableau 2.9). Avec cet équipement, le lo-

cal sombre a besoin, avec un facteur de 24, de plus d'énergie que le local clair avec un luminaire efficace.

Calcul des heures à pleine charge

L'utilisation de la lumière du jour dépend de plusieurs facteurs. Pour le calcul selon la norme SIA 387/4, il existe un modèle simple qui donne une exactitude justifiable pour les prévisions des heures à pleine charge. Au niveau européen, avec la norme EN 15193 «Evaluation énergétique des bâtiments – Exigences énergétiques pour l'éclairage», un modèle sensiblement plus complexe a été élaboré, mais il sort du cadre d'un projet d'éclairage. Le modèle SIA de l'utilisation de la lumière du jour se base sur 9 facteurs d'influence (Illustration 2.13).

■ **Surfaces vitrées:** Plus la surface vitrée est grande, plus la lumière du jour peut remplacer un éclairage artificiel. Un rapport entre surface vitrée et sol supérieur à 35 % n'a pour résultat aucune réduction supplémentaire de la lumière artificielle,

	Local usuel	Local sombre
Grandeur du local	6 m x 6 m x 3 m	
Éclairage lumineux	500 lux	
Facteur de maintenance	0,8	
Type de luminaire	Rayonnement direct	Rayonnement indirect
Type de lampe	Plafonnier LED	
Rendement lumineux des luminaires	120 lm/W	
Rendement normalisé du local	80 %	25 %
Puissance installée	6,5 W/m²	20,8 W/m²
Calcul	$500 / (0,8 \cdot 120 \cdot 0,8)$	$500 / (0,8 \cdot 120 \cdot 0,25)$

Tableau 2.8:
Exemple de calcul 1
«puissance installée».

	Local usuel	Local sombre
Grandeur du local	6 m x 6 m x 3 m	
Éclairage lumineux	500 lux	
Facteur de maintenance	0,8	
Type de luminaire	Rayonnement direct	Rayonnement indirect
Type de lampe	Plafonnier LED	Spot halogène
Rendement lumineux des luminaires	120 lm/W	16 lm/W
Rendement normalisé du local	80 %	25 %
Puissance installée	6,5 W/m²	156,2 W/m²
Calcul	$500 / (0,8 \cdot 120 \cdot 0,8)$	$500 / (0,8 \cdot 16 \cdot 0,25)$

Tableau 2.9:
Exemple de calcul 2
«puissance installée».

parce que les journées d'hiver et le mauvais temps limitent l'utilisation de la lumière naturelle (Illustration 2.14).

■ **Facteur de transmission du verre:** Un facteur de transmission avec un type de vitrage hautement isolant se situe à 70 %. Un vitrage solaire (p.ex. en remplacement des stores) indique des valeurs comprises entre 10 % et 60 %. Les vitrages solaires peuvent limiter la pénétration de la lumière du jour de sorte que la lumière artificielle est bien plus souvent nécessaire.

■ **Lintheau:** Plus le lintheau est bas, plus la profondeur de pénétration de la lumière du jour dans le local est faible. Pour les pièces hautes (plus de 3,5 m), la hauteur du lintheau pèse moins dans la balance que pour les pièces basses.

■ **Lanterneaux:** Les puits de lumière utilisent mieux la lumière du jour que les fenêtres de façade. Il existe plusieurs formes de lanterneaux (globes d'éclairage, toiture shed, etc.). L'importance des lanterneaux pour la pénétration de la lumière du jour

Illustration 2.13:
Facteurs d'influence
de l'utilisation de la
lumière du jour
selon la norme
SIA 387/4.

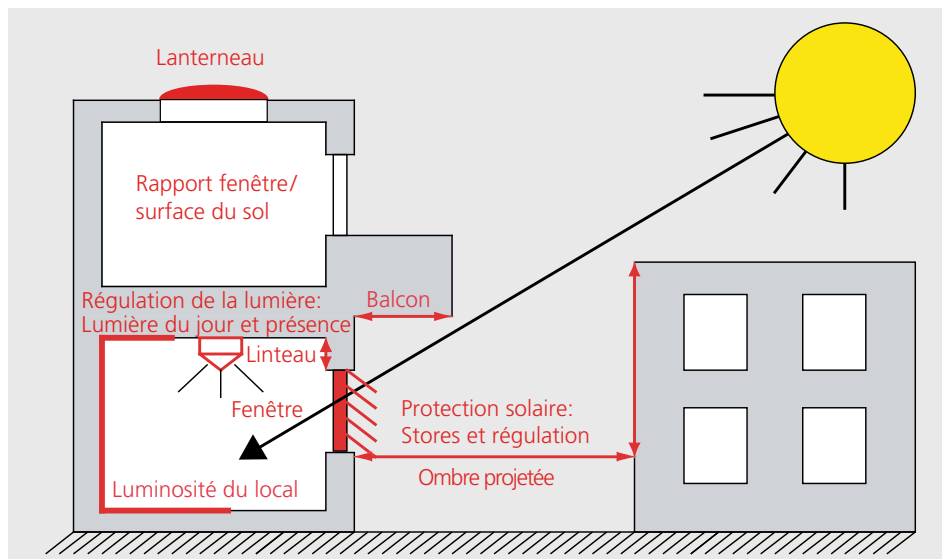
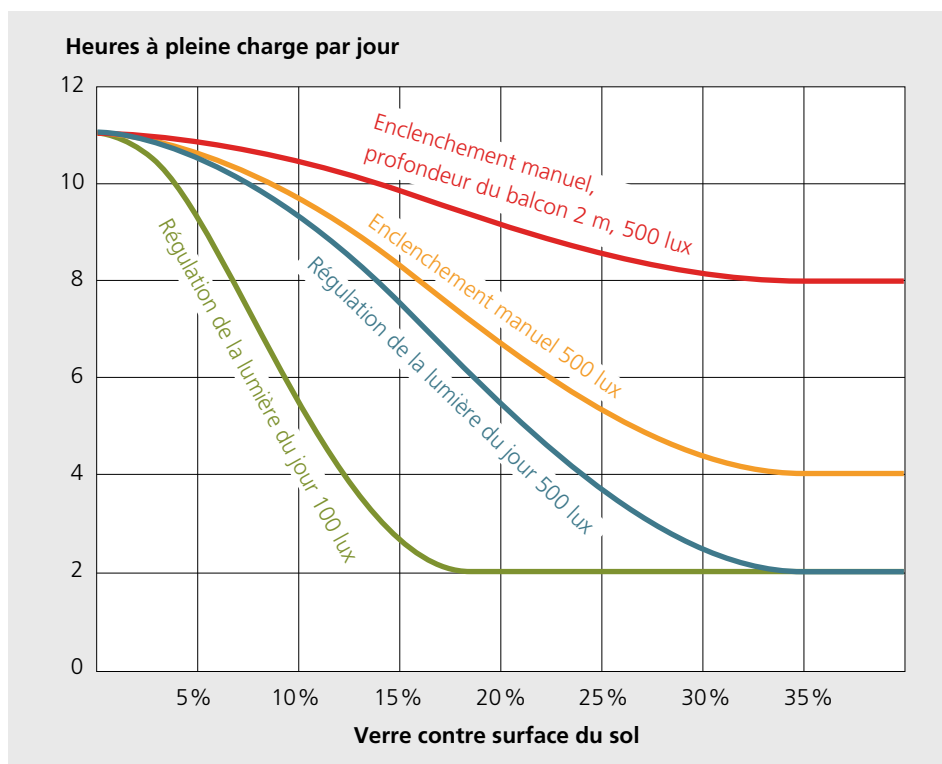


Illustration 2.14:
Heures à pleine
charge d'un éclairage
par jour en relation
avec le rapport verre
contre surface du sol
(4 exemples).



est difficile à quantifier. Dit plus simplement, le gain solaire escompté peut être doublé par rapport aux fenêtres en façade. Il faut accorder une attention particulière aux protections solaires (éblouissement, pénétration de la chaleur).

■ **Réflexion dans le local:** La luminosité normale d'un local correspond aux valeurs par défaut des degrés de réflexion dans la plupart des programmes de simulation courants. Plafond: 70 %, murs: 50 %, sols 20 %. Les locaux clairs sont blancs, à part le mobilier et le revêtement de sol. Les locaux sombres sont par exemple en béton brut ou dans des couleurs sombres (rouge, bleu, noir).

■ **Protection solaire (stores):** La sorte (lamelles ou toile), la clarté (couleur, transparence) et les options d'orientation ont une influence sur l'utilisation de la lumière du jour. Cinq niveaux de qualité sont définis.

■ **Protection solaire (régulation):** Que ce soient des protections à lamelles orientables complètement automatiques (niveau 1), par activation manuelle (niveau 5) ou une solution intermédiaire, la régulation de la protection solaire est également classée en cinq niveaux de qualité.

■ **Profondeur du balcon:** Un balcon en saillie a le même effet qu'un linteau de fenêtre, à savoir qu'il réduit la profondeur de pénétration de la lumière du jour. Pour les linteaux ou les balcons, le plus grand facteur d'influence sera utilisé dans le modèle de calcul.

■ **Ombrage par l'environnement:** Les bâtiments environnants à faible distance, les arbres ou les montagnes réduisent l'utilisation de la lumière du jour. Par mesure de simplification par rapport aux anciennes normes, seules 3 situations sont encore dis-

tinguées: emplacement au centre-ville, vue dégagée et non construite à la campagne et toutes les situations intermédiaires.

■ **Régulation de la lumière (lumière du jour):** Meilleures sont les conditions cadres ci-dessus, plus la régulation de la lumière est possible. La régulation idéale de la lumière combine parfaitement le pourcentage en lumière du jour avec la lumière artificielle supplémentaire nécessaire, de sorte que la même quantité de lumière soit toujours présente dans la pièce. La régulation de lumière optimale n'existe pas, car les capteurs réagissent en retard, sont parfois mal placés ou ne sont pas correctement réglés. Par ailleurs, les régulateurs de lumière possèdent également leur propre consommation d'électricité. Même dans le cas d'une planification et d'une exécution optimales, la norme SIA 387/4 prend en compte le fait que l'équilibre entre lumière du jour et ajout de lumière artificielle n'est pas toujours idéal. La norme SIA 387/4 pondère, dans ses modèles de calcul, la pénétration de la lumière du jour, ce qui est plus faible que les valeurs obtenues avec les programmes complexes de simulation, mais souvent plus proche de la réalité.

■ **Régulation de la lumière (présence):** Les capteurs de lumière les plus utilisés combinent la lumière du jour et la détection de présence dans un seul appareil. Une bonne détection en fonction de la présence et régulée engendre un potentiel d'économie important et abaisse le temps d'utilisation de manière considérable. Dans le tableau 2.10, les économies dues aux détecteurs de présence sont décrites en fonction du type d'utilisation (normal ou sporadique), du type de commande (entièrement ou semi-automatique) et du temps de déclenchement.

Temps de déclenchement des détecteurs de présence	Présence normale		Présence sporadique	
	Semi-automatique	Entièrement automatique	Semi-automatique	Entièrement automatique
1 minute	-50 %	-40 %	-80 %	-70 %
2 minutes	-40 %	-30 %	-70 %	-60 %
5 minutes	-30 %	-20 %	-60 %	-50 %
15 minutes	-20 %	-10 %	-50 %	-40 %

Tableau 2.10: Économies avec détecteurs de présence.

■ **Fonctionnement semi-automatique (marche manuelle – arrêt automatique):** Le détecteur de présence se déclenche automatiquement; la lumière doit être à nouveau enclenchée manuellement. Utilisation recommandée dans les surfaces utiles principales (p.ex. bureau, salle de classe). Temps de déclenchement recommandé: 5 minutes.

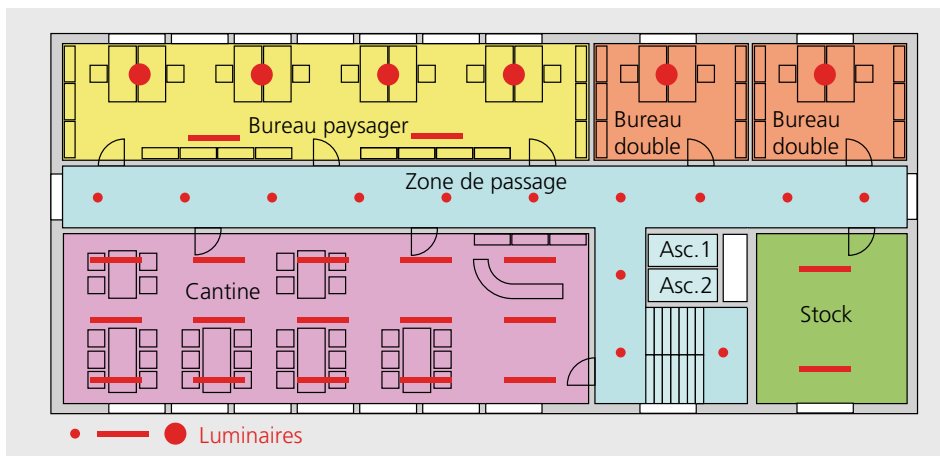
■ **Fonctionnement entièrement automatique (marche et arrêt automatiques):** Le détecteur de présence s'en-

clenche et se déclenche automatiquement. Utilisation recommandée dans les surfaces utiles secondaires (p.ex. couloirs, dépôts, WC, etc.). Temps de déclenchement recommandé: 1 à 2 minutes.

Calcul des besoins en énergie et bilan énergétique

Pour chaque luminaire dans les bâtiments, le besoin énergétique est calculé en tant que produit de la puissance installée et du

Illustration 2.15:
Etage typique d'un bâtiment, différencié selon les utilisations.



● —● Luminaires

Tableau 2.11:
Bilan énergétique selon SIA 387/4 (Valeur du projet).

Groupe de locaux	Surface nette (m ²)	Utilisation	Puissance installée (kW)	Heures à pleine charge (h/a)	Besoin en énergie (MWh/a)
Bureau double 1 ^{er} – 4 ^e étage	500	Bureau de groupe	8	750	6
Bureau paysager	1000	Bureau paysager	12	1250	15
Cantine du personnel 4 ^e étage	500	Cantine	3,5	1000	3,5
Couloir sous-sol, rez-de-chaussée, étage	500	Couloir	2,5	1000	2,5
Stock, technique	500	Locaux annexes	2,0	500	1,0
Ensemble du bâtiment	3000		28,0	1000	28,0

Tableau 2.12:
Bilan énergétique et comparaison des valeurs du projet avec les valeurs limites et cibles.

Groupe de locaux	Surface nette (m ²)	Utilisation	Valeur du projet (kWh/m ²)	Valeur limite (kWh/m ²)	Valeur cible (kWh/m ²)
Bureau double 1 ^{er} – 4 ^e étage	500	Bureau de groupe	12	17,5	2,8
Bureau paysager	1000	Bureau paysager	15	19,1	7
Cantine du personnel 4 ^e étage	500	Cantine	7	8,2	3,2
Couloir sous-sol, rez-de-chaussée, étage	500	Couloir	5	4,9	0,7
Stock, technique	500	Locaux annexes	2	4,2	0,6
Ensemble du bâtiment	3000		9,3	12,2	3,6

nombre d'heures à pleine charge. Pour garder une vue d'ensemble, les valeurs de consommation énergétique des luminaires sont différenciées selon le type de locaux et évaluées sur l'ensemble du bâtiment. Il s'avère utile de donner des couleurs différentes aux utilisations des locaux (Illustration 2.15). La différenciation des locaux selon leur utilisation peut être appliquée de manière relativement large. Généralement, trois à six utilisations différentes par bâtiment sont suffisantes.

Le bilan énergétique conforme à la norme SIA 387/4 (représentation standardisée des besoins en électricité) comprend les puissances, les heures à pleine charge et les valeurs des besoins énergétiques des différents groupes de locaux, classés par utilisation. Les valeurs des luminaires et des locaux ne sont pas représentées (Tableau 2.11).

Evaluation des besoins en énergie

Les valeurs calculées pour les besoins énergétiques (Tableau 2.11) des différents locaux selon leur utilisation (valeurs du projet) sont converties en valeurs spécifiques pour les surfaces et comparées aux exigences. Ces exigences sont définies selon la norme SIA 387/4 comme valeurs limites et valeurs cibles et sont indiquées non pas pour tout un bâtiment mais pour les différentes utilisations dans le bâtiment (Tableau 2.12). A partir des valeurs d'exigence, les différentes utilisations sont pondérées selon les surfaces puis l'exigence sera estimée pour l'ensemble du bâtiment. Les valeurs d'exigence pour les utilisations sont également déterminées à partir de la taille de chaque local et des possibilités d'utilisation de la lumière du jour. En principe, les valeurs limites et les valeurs cibles s'obtiennent en dotant le bâtiment réel de composants compatibles avec la valeur cible, respectivement la valeur limite. Pour éviter des calculs complexes, le calcul s'effectue à l'aide de locaux représentatifs de tous les autres locaux ayant la même utilisation. Pour faciliter les calculs, l'utilisation d'un programme informatique est recommandée.

Exemple: la valeur du projet estimée par rapport aux surfaces dans le tableau 2.12 est calculée comme suit:

Valeur du projet = $(12 \cdot 500 + 15 \cdot 1000 + 7 \cdot 500 + 5 \cdot 500 + 2 \cdot 500) / 3000 \text{ m}^2 = 9,3 \text{ kWh/m}^2$. La valeur limite et la valeur cible pour l'ensemble du bâtiment sont calculées de la même manière.

Finalement, c'est la valeur du projet de l'ensemble du bâtiment qui est estimée. Dans l'exemple, celle-ci est de 9.3 kWh/m^2 entre la valeur cible de 3.6 kWh/m^2 et la valeur limite de 12.2 kWh/m^2 .

Utilisations standard

Afin que les valeurs du projet calculées avec les exigences (valeur limite et valeur cible) soient comparables, les utilisations standard sont valables pour 44 utilisations de pièces différentes (Tableaux 2.13 à 2.15).

Valeur limite et valeur cible SIA 387/4

Pour chaque utilisation standard, une valeur limite et une valeur cible sont calculées. Elles sont obtenues en multipliant la puissance installée par le nombre d'heures à pleine charge. Pour les puissances installées, les valeurs standard s'appliquent selon le tableau 2.13, pour les heures à pleine charge ce sont celles du tableau 2.14. Comme certaines conditions cadres diffèrent de bâtiment à bâtiment (p.ex. surfaces vitrées ou dimensions des locaux), les valeurs limite et cible dans un bâtiment quelconque sont celles découlant du tableau 2.15.

Utilisation	Dimension du local			Hauteur de la surface utilisée (m)	Eclairage lumineux	
	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)		Valeur de maintenance (lux)	Valeur de référence (lux)
Habitation	3,5	4	2,2	0,05	150	150
Chambre d'hôtel	4	5	2,5	0,75	50	300
Réception, Lobby	12	12	4	0,75	100	300
Bureau individuel ou de groupe	6	6	3	0,75	500	500
Bureau paysager	12	12	3	0,75	500	500
Salle de réunion	6	6	3	0,75	500	500
Guichets, réception	12	12	4	0,05	200	300
Salle de classe	10	7	3	0,75	500	500
Salle des maîtres	6	6	3	0,75	300	300
Bibliothèque	12	12	3	0,75	200	300
Salle de conférences	12	12	3	0,75	500	500
Salle de classe spécialisée	10	7	3	0,75	500	500
Vente de denrées alimentaires	20	20	4	0,05	300	750
Magasin spécialisé	20	20	4	0,05	300	750
Vente de meubles, construction et jardin	20	20	4	0,05	300	600
Restaurant	12	12	3	0,75	200	300
Restaurant self-service	20	20	3	0,75	200	300
Cuisine de restaurant	6	6	3	0,75	500	500
Cuisine de restaurant self-service	12	12	3	0,75	500	500
Salle d'entretien	20	20	7	0,75	300	300
Salle polyvalente	20	20	7	0,75	300	300
Halle d'exposition	20	20	7	0,75	300	600
Chambre des patients	6	6	2,5	0,75	100	300
Local des infirmières	6	6	3	0,75	300	500
Salle de traitement	6	6	3	0,75	500	750
Production (travail grossier)	20	20	7	0,75	300	300
Production (travail fin)	20	20	7	0,75	500	500
Laboratoire	10	7	4	0,75	500	500
Entrepôt	20	20	7	0,05	300	300
Salle de gymnastique	30	20	7	0,05	300	500
Salle de fitness	12	12	3	0,05	300	300
Piscine couverte	20	20	7	0,05	300	300
Couloir	10	2	2,5	0,05	100	100
Couloir 24h	10	2	2,5	0,05	200	200
Cage d'escaliers	10	2	2,5	0,05	100	100
Locaux annexes	4	5	2,5	0,05	100	100
Cuisine, cuisinette	4	5	2,5	0,75	200	200
WC, bain, douche	4	5	2,5	0,05	200	200
WC	2	2	2,5	0,05	200	200
Vestiaires, douches	6	6	3	0,05	200	200
Parking souterrain	20	20	3	0,05	75	75
Buanderie	6	6	3	0,05	300	300
Chambre frigorifique	6	6	3	0,05	100	100
Salle des serveurs	4	5	3	0,05	100	100

Tableau 2.13: Exigences standard SIA 387/4 pour déterminer les puissances installées. On utilise les valeurs type pour les dimensions du local; dans le projet, il faudrait, si possible utiliser les dimensions effectives pour chaque local type. L'éclairage lumineux de référence est en partie supérieur à la valeur de maintenance (selon EN 12464). L'augmentation tient compte de la nécessité d'un éclairage d'accentuation dans certaines utilisations.

Utilisation	Heures d'utilisation				Surface vitrée au sol (%)	Type d'utilisation
	Heures Jour + nuit (h/j)	Simultanéité annuelle	Jours par an (j/a)	Heures par an (h/a)		
Habitation	1 + 2	0,9	365	986	19 %	DP
Chambre d'hôtel	3 + 2	0,7	365	1533	18 %	DP
Réception, Lobby	11 + 9	0,7	365	5110	20 %	DP
Bureau individuel ou de groupe	11	0,8	261	2297	29 %	NP
Bureau paysager	11	0,8	261	2297	15 %	NP
Salle de réunion	6	0,8	261	1253	29 %	NP
Guichets, réception	11	0,8	261	2297	20 %	DP
Salle de classe	11	0,7	261	2010	25 %	NP
Salle des maîtres	11	0,7	261	2010	29 %	NP
Bibliothèque	11	0,7	261	2010	15 %	NP
Salle de conférences	11	0,7	261	2010	15 %	NP
Salle de classe spécialisée	11	0,7	261	2010	25 %	NP
Vente de denrées alimentaires	11 + 5	0,8	313	4006	0 %	DP
Magasin spécialisé	11 + 5	0,8	313	4006	0 %	DP
Vente de meubles, construction et jardin	11 + 5	0,8	313	4006	0 %	DP
Restaurant	6 + 6	0,8	313	3005	15 %	NP
Restaurant self-service	7	0,8	313	1753	9 %	NP
Cuisine de restaurant	8 + 5	0,8	313	3255	29 %	DP
Cuisine de restaurant self-service	9	0,8	313	2254	15 %	DP
Salle d'entretien	6 + 6	0,8	313	3005	0 %	DP
Salle polyvalente	11 + 5	0,8	313	4006	21 %	DP
Halle d'exposition	11 + 5	0,8	313	4006	21 %	DP
Chambre des patients	11 + 3	0,8	365	4088	25 %	DP
Local des infirmières	11 + 13	0,8	365	7008	29 %	DP
Salle de traitement	11	0,8	313	2754	29 %	DP
Production (travail grossier)	11 + 13	0,8	261	5011	21 %	NP
Production (travail fin)	11	0,8	261	2297	21 %	NP
Laboratoire	11	0,8	261	2297	34 %	DP
Entrepôt	11 + 13	0,8	261	5011	21 %	NP
Salle de gymnastique	10 + 5	0,7	261	2741	21 %	NP
Salle de fitness	10 + 5	0,8	313	3756	15 %	NP
Piscine couverte	10 + 5	0,8	313	3756	21 %	NP
Couloir	11 + 2	0,8	365	3796	44 %	SP
Couloir 24h	11 + 13	0,8	365	7008	44 %	SP
Cage d'escaliers	11 + 2	0,8	365	3796	44 %	SP
Locaux annexes	11 + 2	0,8	365	3796	18 %	SP
Cuisine, cuisinette	11	0,8	261	2297	18 %	SP
WC, bain, douche	11	0,8	261	2297	18 %	SP
WC	11	0,8	261	2297	44 %	SP
Vestiaires, douches	11	0,8	313	2754	18 %	SP
Parking souterrain	11	0,8	365	3212	0 %	SP
Buanderie	11	0,8	365	3212	18 %	SP
Chambre frigorifique	0,5	0,8	261	104	0 %	SP
Salle des serveurs	0,5	0,8	365	146	0 %	DP

Tableau 2.14: Exigences standard de la norme SIA 387/4 pour déterminer les heures à pleine charge. Lors des utilisations standard pour le calcul des heures à pleine charge, on se base sur les valeurs type pour le rapport entre les vitrages et la surface du sol. Dans la mesure du possible, il faudrait utiliser les valeurs effectives du projet pour chaque type de pièce. NP: utilisation normale, SN: utilisation sensible, SP: utilisation sporadique.

Utilisation	Valeur limite SIA 387/4			Valeur cible SIA 387/4		
	Puissance installée (W/m ²)	Heures à pleine charge (h/a)	Demande en électricité (kWh/m ²)	Puissance installée (W/m ²)	Heures à pleine charge (h/a)	Demande en électricité (kWh/m ²)
Habitation	4,6	1000	4,6	3,0	750	2,3
Chambre d'hôtel	7,7	700	5,4	5,0	550	2,8
Réception, Lobby	6,6	4100	27,1	4,3	3150	13,5
Bureau individuel ou de groupe	12,5	1400	17,5	8,1	350	2,8
Bureau paysager	9,8	1950	19,1	6,4	1100	7,0
Salle de réunion	12,5	750	9,4	8,1	200	1,6
Guichets, réception	7,1	1450	10,3	4,6	700	3,2
Salle de classe	11,0	1300	14,3	7,2	450	3,2
Salle des maîtres	7,5	1150	8,6	4,9	250	1,2
Bibliothèque	5,9	1500	8,9	3,8	700	2,7
Salle de conférences	9,8	1700	16,7	6,4	950	6,1
Salle de classe spécialisée	11,0	1300	14,3	7,2	450	3,2
Vente de denrées alimentaires	14,9	4000	59,6	9,7	4000	38,8
Magasin spécialisé	14,9	4000	59,6	9,7	4000	38,8
Vente de meubles, construction et jardin	12,0	4000	48,0	7,8	4000	31,2
Restaurant	5,9	2650	15,6	3,8	1600	6,1
Restaurant self-service	5,3	1550	8,2	3,4	950	3,2
Cuisine de restaurant	12,5	2450	30,6	8,1	1700	13,8
Cuisine de restaurant self-service	9,8	1900	18,6	6,4	1550	9,9
Salle d'entretien	7,0	3000	21,0	4,5	3000	13,5
Salle polyvalente	7,0	2950	20,7	4,5	2000	9,0
Halle d'exposition	13,9	3400	47,3	9,0	2800	25,2
Chambre des patients	6,8	1550	10,5	4,4	800	3,5
Local des infirmières	12,5	5750	71,9	8,1	4550	36,9
Salle de traitement	18,8	1900	35,7	12,2	1150	14,0
Production (travail grossier)	7,0	4150	29,1	4,5	2350	10,6
Production (travail fin)	11,6	1700	19,7	7,5	750	5,6
Laboratoire	12,8	1350	17,3	8,3	400	3,3
Entrepôt	7,3	4150	30,3	4,7	2350	11,0
Salle de gymnastique	11,3	2250	25,4	7,3	1250	9,1
Salle de fitness	6,4	3150	20,2	4,1	1800	7,4
Piscine couverte	7,3	2800	20,4	4,7	1350	6,3
Couloir	3,5	1400	4,9	2,3	300	0,7
Couloir 24h	7,1	3000	21,3	4,6	1100	5,1
Cage d'escaliers	3,5	1400	4,9	2,3	300	0,7
Locaux annexes	3,0	1400	4,2	1,9	300	0,6
Cuisine, cuisinette	5,1	850	4,3	3,3	150	0,5
WC, bain, douche	6,0	850	5,1	3,9	150	0,6
WC	9,9	800	7,9	6,4	150	1,0
Vestiaires, douches	5,7	850	4,8	3,7	200	0,7
Parking souterrain	1,4	1600	2,2	0,9	800	0,7
Buanderie	8,5	1100	9,4	5,5	300	1,7
Chambre frigorifique	2,8	50	0,1	1,8	50	0,1
Salle des serveurs	3,3	50	0,2	2,2	50	0,1

Tableau 2.15: Valeurs limites et valeurs-cibles types SIA 387/4 selon les utilisations standard.

Note: Dans la norme imprimée de 2017, les valeurs sont incorrectes, la SIA a publié un rectificatif à mi-2019.

2.6 Standard Minergie

Depuis 1998, Minergie est un standard de confort, efficacité et préservation des valeurs. Le label de qualité pour les nouvelles constructions et les rénovations comprend toutes les catégories de bâtiments. Les buts visent un confort optimal pour les habitations et les lieux de travail, une faible consommation de chaleur et d'électricité et la conservation de la valeur à long terme. L'accent est mis sur une enveloppe de bâtiment de haute qualité, un échange d'air contrôlé, un éclairage optimal et un approvisionnement efficace en énergies renouvelables. Le label comprend les trois standards Minergie, Minergie P et Minergie A, ainsi que le complément ECO. Minergie-P signifie bâtiments à faible consommation d'énergie et Minergie-A signifie bâtiments à énergie positive. Le complément ECO peut être combiné avec tous les standards et signale les bâtiments, qui tiennent également compte des aspects écologiques et sanitaires du processus de construction. Minergie couvre donc les critères importants d'une construction durable: confort, préservation des valeurs, efficacité énergétique, écologie du bâtiment et santé. Deux produits supplémentaires assurent la qualité de la construction et de l'exploitation. Le label convient aussi bien aux bâtiments pionniers innovants qu'à une large pénétration du marché.

Le standard a été complètement révisé en 2017 et de nouveaux thèmes y ont été intégrés: outre la demande en énergie de chauffage, précédemment évaluée, la demande en énergie électrique et la production d'électricité par le biais du photovoltaïque ont également été incluses dans le nouvel indice Minergie. Un système d'assurance qualité a aussi été introduit pour la construction et l'exploitation des bâtiments Minergie ainsi qu'une obligation de surveillance pour certains bâtiments.

En chiffres (2018)

- Seulement 470 000 bâtiments certifiés
 - bâtiments d'habitation: 88 %, bâtiments utilitaires: 12 %
- Surface totale: 54 Mio. m² – bâtiments d'habitation: 63 %, bâtiments utilitaires: 37 %
- 1,1 million d'utilisateurs et 1900 partenaires spécialisés
- Un conseil d'administration de 12 membres issus de la politique et de l'économie
- Bureaux à Bâle, Sion et Bellinzone avec un total d'environ 20 collaborateurs
- Environ 28 organismes de certification dans les cantons (pour la plupart intégrés dans les services de l'énergie, parfois en collaboration)
- 8 partenaires industriels majeurs (partenaires principaux).

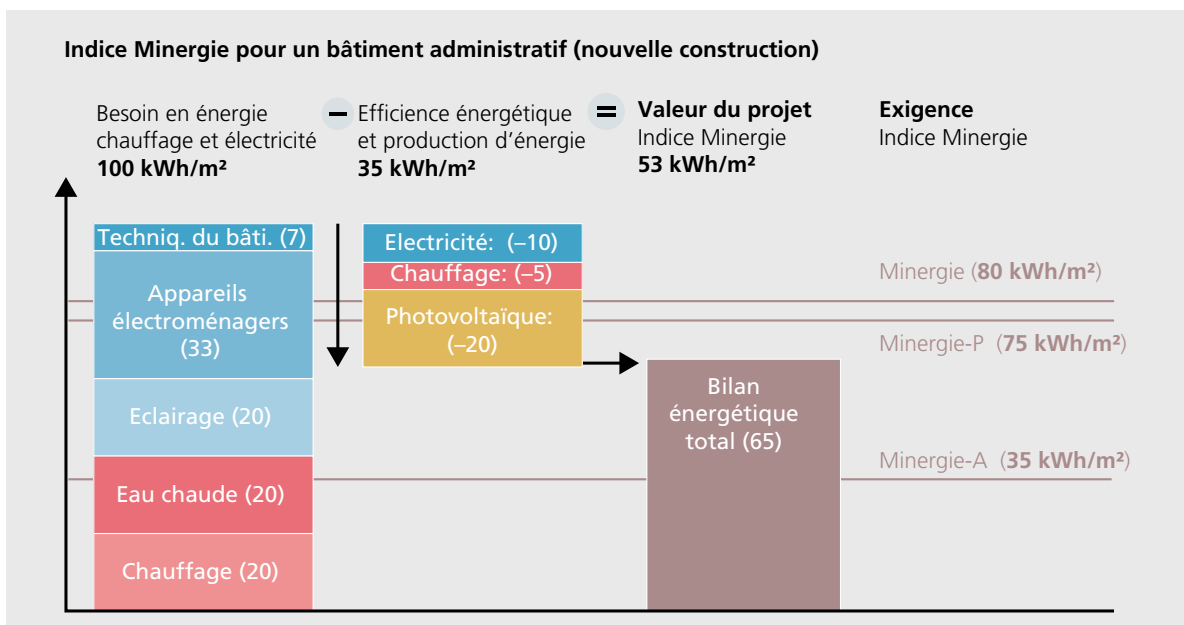


Illustration 2.16: Calcul de l'indice Minergie et référence à une exigence par un exemple. (Source: Minergie)

Indice-Minergie

L'illustration 2.16 montre l'interaction des consommateurs d'énergie et de la production d'énergie avec l'indice Minergie et l'évaluation selon les normes Minergie, Minergie-P et Minergie-A. Concernant les besoins en chaleur (chauffage et eau chaude), les valeurs standard pour l'électricité (éclairage, appareils électroménagers, technique du bâtiment) sont calculées (pondérées par un coefficient 2), ce qui donne le résultat de la demande totale standard en énergie, 100 kWh/m² pour un bâtiment administratif. Par des mesures d'optimisation pour l'électricité (actuellement possible essentiellement par l'éclairage), l'énergie thermique et par la pose d'une installation photovoltaïque, la valeur d'exigence standard peut diminuer d'environ 35 kWh/m², un indice Minergie de 65 kWh/m² peut alors être atteint. En référence aux exigences des trois standards, le résultat est un label pour une maison Minergie-P (75 kWh/m²). Pour atteindre le label Minergie A, il faut clairement planifier plus de production propre d'énergie.

Eclairage Minergie

La valeur du projet pour l'éclairage est essentiellement déterminée avec le modèle de calcul de la SIA 387/4. L'exigence en matière d'éclairage dans un bâtiment Minergie sont dérivées des exigences du système selon la norme SIA 387/4. Toutes les constructions d'une surface d'au moins 250 m² (à quelques exceptions près et sans logements) doivent aussi remplir les exigences complémentaires en matière d'éclairage. Ceci s'applique également à toutes les normes de construction: Minergie, Minergie-P, Minergie-Eco et Minergie-A. L'exigence pour l'éclairage Minergie se situe à égale distance entre la valeur limite et la valeur cible (Illustration 2.17).

2.7 Autres applications de la SIA 387/4

L'application la plus célèbre de la SIA 387/4 se situe dans le cadre des standards Minergie. D'autres applications dans les législations cantonales et dans les programmes d'encouragement de la Confédération sont de plus en plus importantes.

MoPEC

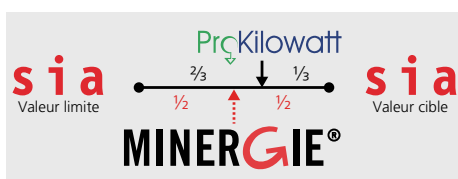
Elaboré par les cantons, le «Modèle de prescriptions énergétiques des cantons» (MoPEC) est un ensemble complet des modèles de réglementations légales en matière d'énergie dans le secteur du bâtiment. Il représente le «dénominateur commun» des cantons. L'objectif du MoPEC est d'atteindre un degré élevé d'harmonisation dans le domaine des réglementations cantonales en matière d'énergie afin de simplifier les procédures de planification et d'approbation des constructions pour les maîtres d'œuvre et les professionnels travaillant dans plusieurs cantons. L'harmonisation s'appuie en outre sur l'utilisation de formulaires et d'aides à l'exécution élaborés conjointement. Actuellement, les différents cantons sont occupés à mettre en œuvre la version 2014. Plus d'informations sur: www.endk.ch/fr/politique-energetique/mopec

ProKilowatt

ProKilowatt – émetteur d'appels d'offres – est le nom du programme de soutien de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) visant à réduire la consommation d'électricité dans les ménages, l'industrie, le commerce et les entreprises de services. Une procédure d'adjudication est utilisée: les mesures d'efficacité électrique présentant le meilleur rapport coût-bénéfice sont retenues.

Le programme de soutien national lancé en 2010 a soutenu un total de 473 projets et programmes à fin 2017 pour un montant total de CHF 157 millions. Les économies d'énergie réalisées s'élèvent à 470 GWh. Les projets et programmes dans le domaine de l'éclairage, très appréciés, représentent la moitié des subventions.

Illustration 2.17:
Définition des exigences Minergie pour l'éclairage entre valeur limite et valeur cible.



Pour les projets importants, les maîtres d'œuvre intéressés peuvent directement contacter ProKilowatt. Pour cela, des appels d'offres annuels sont lancés. Pour des projets plus modestes dans le domaine de l'éclairage, les programmes suivants sont à disposition dès 2019:

- www.ffeled.ch: tous les bâtiments administratifs dès 2000 m² de surface éclairée (national)
- www.belhallen.ch: bâtiments industriels et halles de sport dès 2000 m² de surface éclairée (national)
- www.minus60.ch: tous les bâtiments administratifs de moins de 2000 m² de surface éclairée (la plupart des cantons)
- www.senso70.ch: succède au programme minus60 (toute la Suisse)
- www.effi watt.ch: tous les bâtiments administratifs de moins de 2000 m² de surface éclairée (les cantons non couverts par Minus60)
- www.salvaluce.ch: tous les immeubles résidentiels de plus de 2000 m² de surface éclairée
- autres programmes dans des domaines spécifiques.

Les programmes sont gérés par des organismes privés sur mandat de ProKilowatt ou de l'Office fédéral de l'énergie.

2.8 Outils de calcul

Différents outils logiciels sont disponibles pour le calcul et la vérification énergétique selon la norme SIA 387/4.

www.lighttool.ch

Le programme en ligne de Minergie est disponible gratuitement en allemand, français et italien. Contrairement aux outils coûteux, il se limite à des bâtiments simples avec peu d'usages différents. La création d'un certificat est simple et rapide. Il n'y a pas de lien possible avec les simulations d'éclairage (ReluxEnergyCH) ou d'autres calculateurs d'énergie (Lesosai). La justification se fait en 5 étapes:

1. Données générales du bâtiment (adresse, données, catégorie de bâtiment)
2. Enregistrement des luminaires installés
3. Enregistrement des locaux ou groupes de locaux (classés par utilisation standard ou utilisation spécifique)
4. Certificat énergétique: création automatique du bilan énergétique et comparaison avec les besoins
5. Rapport PDF avec toutes les données saisies et les résultats

The screenshot shows the MINERGIE® lighttool interface. At the top, there are four tabs: 1. Projet, 2. Luminaires, 3. Local (highlighted in yellow), and 4. Bilan énergétique. Below the tabs, there are three buttons: '+ Nouvelle pièce', '- Effacer la pièce', and 'Mode d'emploi PDF'. The main form area is titled 'Local ou groupe de locaux' and contains several input fields: 'Nom du local (max. 20 signes)' with 'Salle de classe', 'Description (pouv. étage, nombre de locaux)', 'Surface nette (m²)' with '1239', 'Utilisation du local' with 'Salle de classe', 'L'intensité lumineuse (lx)' with '500', and 'Régulation par la présence' with 'Auto on-off, 5 min.'. At the bottom, there is a section for 'Utilisation de la lumière naturelle' with radio buttons for 'Oui' (selected) and 'Non'.

Illustration 2.18: Un des quatre masques de Lighttool.

ReluxEnergyCH

Le programme complet ReluxDesktop utilise le logiciel Windows pour planifier l'éclairage de bâtiments de toutes tailles. Une licence annuelle est due pour cet outil de calculation d'énergie.

Pour les bâtiments plus complexes, l'outil ReluxEnergyCH est plus adapté: n'importe quels groupes de locaux et de types d'éclairages peuvent être saisis. Le résultat est généré sous forme de rapport PDF qui présente le bilan énergétique en regard des exigences (SIA-valeurs limites, SIA-valeurs cibles, Minergie).

Travailler avec Relux-Desktop (ou avec le produit allemand Dialux) fait partie du standard d'une planification d'éclairage:

- Dans une seule banque de données online, plus de 200 000 luminaires, d'environ 100 fabricants de toute l'Europe, est à disposition. Elle est mise à jour et complétée en continu.

- Les locaux peuvent être saisis individuellement, avec des centaines de matériaux différents, ainsi que de portes, fenêtres, luminaires. Les locaux peuvent être saisis en deux ou trois dimensions et visualisés dans toutes les directions.

- Les luminaires peuvent être planifiés automatiquement ou manuellement.

- Sur simple clic, la répartition de la lumière dans la pièce est simulée et visualisée de différentes manières: tableaux, graphiques

Isolux, images tridimensionnelles en pseudo-couleurs ou sous forme photoréaliste (rendering).

- Pour un effet encore plus professionnel, un programme CAD peut être importé et l'éclairage est directement intégré au plan des architectes.

- L'éclairage extérieur et les tunnels sont également compris dans le programme.

ReluxDesktop offre de nombreuses options et possibilités de visualisation, par conséquent, son utilisation est intuitive. Une formation est toutefois conseillée.

Lesosai

Un programme informatique pour l'équilibrage et l'optimisation de la demande totale en énergie dans les bâtiments peut être obtenu sous www.lesosai.com.

L'éclairage selon la norme SIA 387/4 fait partie du logiciel de la société E4tech Sàrl, basée à Lausanne.

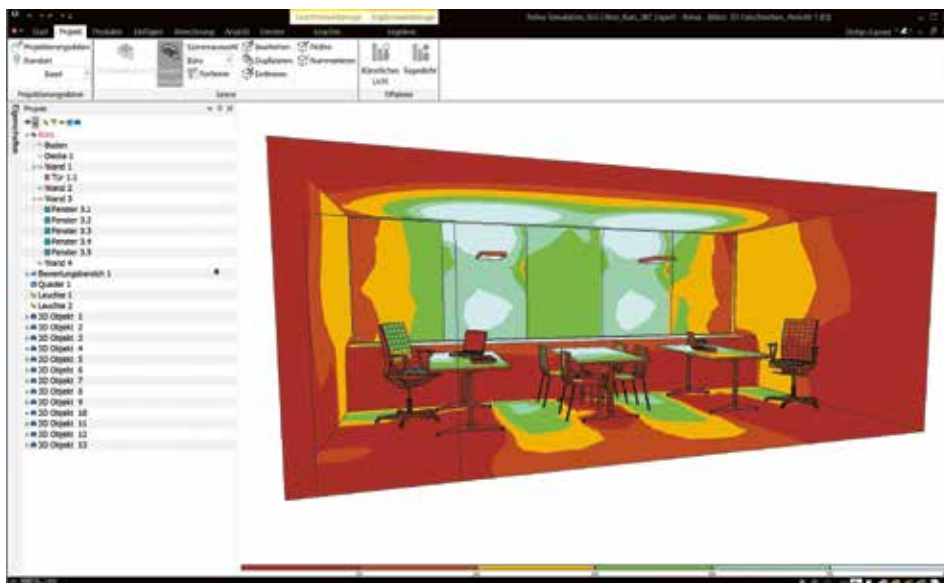


Illustration 2.19:
Capture d'écran du
logiciel Relux-
Desktop.

2.9 Contrôle de l'éclairage des bâtiments utilitaires

Pour évaluer un éclairage existant dans un bâtiment, la vérification de l'éclairage, comme décrit ci-dessous, convient parfaitement. La base de ce contrôle constitue la norme SIA 387/4. Le bilan énergétique permet une comparaison avec des valeurs de référence de la norme SIA 387/4 et donc une estimation du potentiel d'économies.

Démarche de vérification

1. Sélection des locaux types
2. Saisie des luminaires
3. Mesure de l'éclairement lumineux
4. Evaluation de l'éblouissement des luminaires
5. Evaluation de la situation de la lumière du jour
6. Vérification de la régulation lumineuse
7. Elaboration du bilan énergétique

Sélection des locaux types

En règle générale, il n'est pas nécessaire d'enregistrer tous les locaux d'un bâtiment, parce que la plupart des locaux sont identiques ou très ressemblants. Le calcul et l'évaluation se font au moyen des locaux représentatifs, par exemple une salle de classe ou un bureau (Tableau 2.16 et Illustration 2.20).

L'expérience montre que trois à cinq affectations des locaux les plus importantes constituent plus de 80 % de la consommation d'électricité pour l'éclairage. Il est par conséquent d'importance secondaire de savoir quel éclairage est par exemple installé dans les dépôts ou les WC. Dans les plans d'ensemble du bâtiment, les différentes utilisations peuvent être colorées. A partir de ces locaux types, on détermine les surfaces nettes. Naturellement, les surfaces des autres pièces doivent également être prises en compte pour un bilan énergétique.

Utilisation	Surface d'un local type (m ²)	Surface de tous les locaux (m ²)
Salle de classe	72	372
Bureau	40	120
Couloir	50	352
Autres locaux	–	80
Total		941

Tableau 2.16: Surfaces d'éclairage pour locaux types selon l'utilisation et total pour le bâtiment.

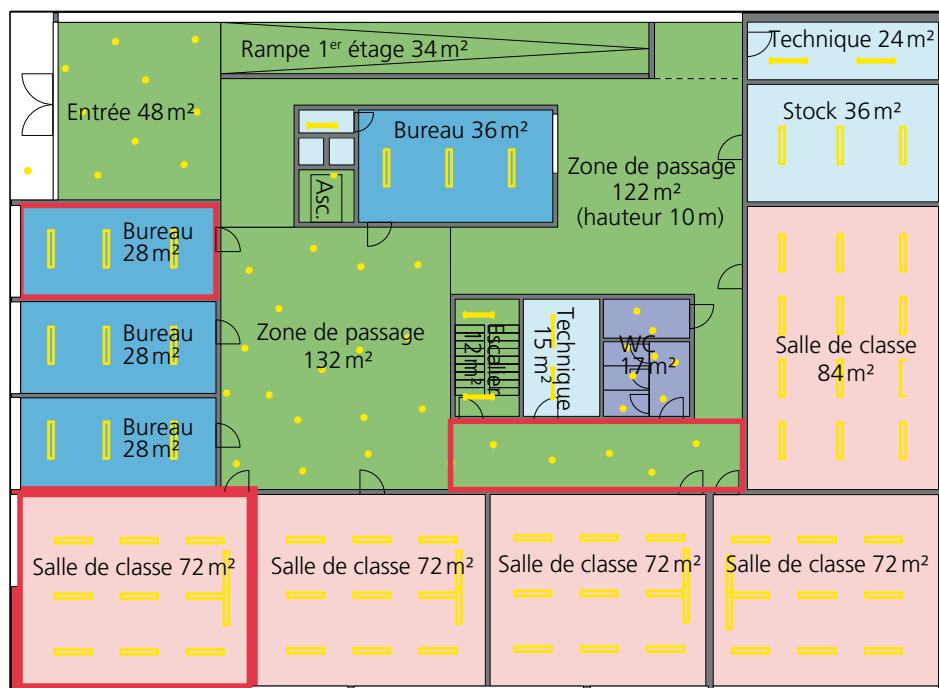


Illustration 2.20: Ensemble d'un bâtiment scolaire avec marquage des utilisations et locaux types.

Saisie des luminaires

Dans chaque local type, les surfaces, le nombre de luminaires et leur puissance sont enregistrés et la puissance installée spécifique est calculée.

■ **Luminaires avec tubes fluorescents:** Les éclairages utilisés ont une puissance normalisée, par exemple 28 watts ou 58 watts pour les lampes fluorescentes. Les wattages sont imprimés sur les sources lumineuses (si nécessaire, il faut retirer le couvercle de la lampe pour pouvoir l'identifier). En plus de la puissance de la lampe, la perte de puissance du ballast doit être ajoutée à la puissance de la lampe (plus environ 10 %) afin

d'obtenir la puissance effective de l'ensemble du luminaire. Exemple: un luminaire avec deux tubes fluorescents à 28 watts et une perte de puissance du ballast de 5 watts présente une puissance totale de 61 watts.

■ **Luminaires LED:** La puissance électrique n'est souvent pas aussi facile à déterminer qu'avec des luminaires conventionnels à lampes fluorescentes. Dans la plupart des cas, une fiche technique du luminaire doit être obtenue afin de déterminer la puissance électrique.

Le tableau 2.17 montre l'équilibre entre la performance des luminaires utilisés et la valeur totale du projet pour une salle de classe (1182 watts). Dans le tableau 2.18, la valeur du projet est donnée par rapport à une puissance pour 72 m² et comparée aux exigences (voir tableau 21: colonnes - production spécifique pour les valeurs limites et cibles). La valeur du projet de 16,4 W/m² est nettement supérieure à la valeur limite et à la valeur cible de la SIA.

Illustration 2.21:
Salle de classe type
avec plan des
installations.

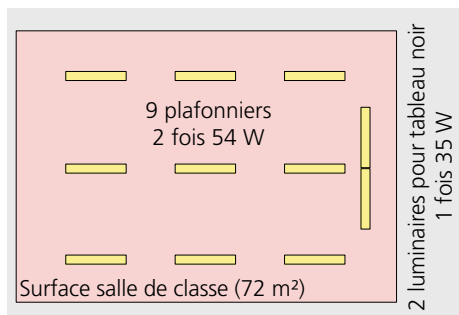


Illustration 2.22:
Vue intérieure de la
salle de classe,
vérifiée.



Tableau 2.17:
Bilan électrique
d'une salle de classe
type.

	Catégorie de luminaires	Puissance du système	Nombre	Puissance totale
Type de luminaire 1	Luminaire suspendu	122 W	9	1098 W
Type de luminaire 2	Luminaire tableau noir	42 W	2	84 W
Valeur de l'objet				1182 W

Tableau 2.18:
Comparaison avec
les exigences pour
une salle de classe
type.

	Surface	Valeur de l'objet	Valeur limite	Valeur cible
Salle de classe	72 m ²	16,4 W/m ²	11,0 W/m ²	7,2 W/m ²

Mesure de l'éclairage lumineux

L'éclairage lumineux (horizontal) dans un local sombre se mesure à différents endroits avec un luxmètre (Illustration 2.23). Dans les locaux de travail, l'éclairage lumineux est mesuré sur le plan de travail, dans tous les autres locaux sur le sol. Le luxmètre doit être de bonne qualité et générer une « correction de V-Lambda » (distribution de la sensibilité chromatique de l'œil humain).

■ Les lampes fluorescentes n'atteignent leur luminosité totale qu'après plusieurs minutes. Par conséquent, un éclairage devrait être en service au moins 15 minutes avant la mesure. Avec des luminaires LED, aucun temps d'attente ne doit être prévu, les luminaires donnent immédiatement leur intensité lumineuse totale.

■ Le local doit être le plus sombre possible. Lorsque cela n'est pas possible, une mesure de la différence peut également être effectuée. A ces fins, on mesure à des points définis l'éclairage lumineux avec et sans la lumière artificielle et on fait la différence entre les deux valeurs mesurées. Cette méthode n'est pas recommandée en cas de grande pénétration de la lumière du jour.

■ Les points de mesure s'orientent logiquement vers une grille (Illustration 2.24).

■ La mesure doit être effectuée à l'endroit le plus clair, par exemple au milieu du local et à environ 1 m de distance du mur. 10 à 15 mesures par local sont suffisantes.

■ A partir des résultats des mesures, la valeur moyenne est obtenue et arrondie à 50 lux. Des données plus précises ne sont pas adéquates.

■ L'éclairage lumineux mesuré peut être comparé aux valeurs correspondantes de la norme SIA 387/4.

Evaluer l'éblouissement

Outre l'éclairage lumineux, la norme EN 12464 stipule, également, que l'éblouissement doit répondre à des exigences. Les mesurer est relativement complexe. Seule une évaluation subjective peut être effectuée lors du contrôle de l'éclairage. Les indications suivantes peuvent être observées pour identifier un éblouissement élevé.

■ De petits luminaires avec une surface lumineuse modeste éblouissent plus qu'un luminaire avec une plus grande surface lumineuse.

■ Lorsqu'un contact visuel direct avec la lumière est protégé, l'éblouissement est réduit.

■ Un grand nombre de luminaires de faible puissance éblouissent moins que quelques luminaires de grande puissance (par exemple, importants dans les salles de gym et autres halles).

La position de l'utilisateur est importante pour l'évaluation, elle doit correspondre à une utilisation type dans la pièce – s'allonger sur le sol et regarder directement dans le luminaire, rendra chaque luminaire éblouissant!

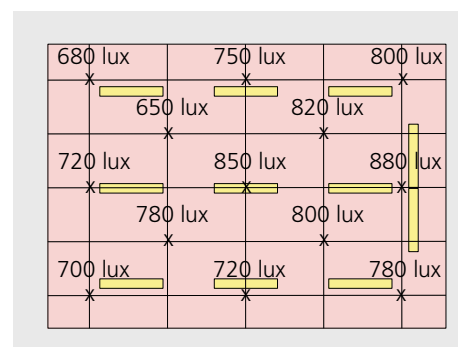


Illustration 2.23 (à gauche): Luxmètre pour mesurer l'éclairage lumineux.

Illustration 2.24 (à droite): Grille de mesure pour l'éclairage lumineux.

	Niveau d'éclairage lumineux E			Uniformité U_0
	E_{moyen}	E_{min}	E_{max}	$E_{\text{min}}/E_{\text{moyen}}$
Valeur de l'objet	750	650	850	0,88
Exigence	500	–	–	au moins 0,6

Tableau 2.19: Exigences EN 12464 et SIA 387/4 pour le niveau d'éclairage lumineux et l'uniformité.

Evaluation de l'utilisation de la lumière du jour

La possibilité d'utiliser la lumière du jour et donc d'économiser l'éclairage artificiel dépend de nombreux facteurs. Au premier abord, l'utilisation de la lumière du jour peut être évaluée sur la base de 5 facteurs d'influence. Le procédé présenté ici est une simplification du modèle d'éclairage selon SIA 387/4 et utile pour le contrôle de l'éclairage (Tableau 2.20).

■ **Rapport vitrage/surface au sol:** Rapport entre la surface nette du plancher d'un local et la surface vitrée nette des fenêtres dans le local

■ **Ombrage par l'environnement:** Est-ce que le bâtiment est situé en pleine ville, en rase campagne ou entre les deux?

■ **Luminosité de la pièce:** Les pièces lumi-

neuses ont non seulement des murs et des plafonds blancs, mais aussi des meubles clairs (et peu nombreux). Les pièces sombres ont des murs aux couleurs intenses ou foncées, en béton apparent ou en bois. Tout ce qui se trouve entre les deux peut être considéré comme «normal».

■ **Types de protections solaires:** Les stores peuvent être extérieur à lamelles (clairs, moyens, sombres) ou en tissus à l'intérieur comme à l'extérieur (clairs, moyens, sombres). Une protection solaire n'est pas forcément toujours nécessaire. Surtout les locaux orientés au nord ou les locaux pour lesquels la lumière directe est partiellement masquée par l'environnement (bâtiment, arbres) peuvent par ailleurs fournir une protection solaire allant de moyenne à bonne.

Facteur influent	Effet de lumière du jour		
	bon	moyen	faible ou nul
Fenêtre sur la surface du sol	plus de 25 %	15 % à 25 % X	moins de 15 %
Ombrage par l'environnement	vue dégagée	vue partiellement réduite X	centre-ville
Clarté de la pièce	clair	normal	sombre X
Protection solaire à lamelles	lamelles claires X	lamelles sombres ou stores clairs	stores sombres
Régulation de la protection solaire	totale-ment auto-matisé, en fonction de la météo	automatisation simplifiée X	manuel
Evaluation générale		X	

Tableau 2.20: Grille simple pour l'évaluation de l'utilisation de la lumière du jour.

Illustration 2.25: Protection solaire en comparaison avec lamelles claires (bon), stores à lamelles (effet moyen) ou volets roulants intérieurs (peu judicieux). (Photos: Schenker Storen AG, Stobag AG, JalouCity)



■ **Régulation des protections solaires:** Est-ce que la régulation de la protection solaire est entièrement automatisée et réglée selon la météo, avec une régulation simplifiée ou encore utilisable manuellement (électrique ou mécanique)?

Une évaluation globale simple peut être effectuée à l'aide du tableau 2.20. La majorité des évaluations applicables détermine la valeur totale.

Vérification de la régulation de l'éclairage

Les heures effectives à pleine charge d'un éclairage dépendent de l'utilisation individuelle et varient donc d'un projet à l'autre. Les valeurs de référence selon la norme SIA 387/4 se basent sur un comportement standardisé de l'utilisateur. Ce qui permet d'obtenir des nombres d'heures à pleine charge comparables en fonction de la situation de la lumière du jour, du type de commande de l'éclairage et de l'utilisation, pour la valeur du projet.

■ **Valeur limite SIA:** Contrôle manuel de la lumière du jour et de la présence. L'éclairage est enclenché ou déclenché manuellement par un interrupteur.

■ **Valeur cible SIA:** Régulation de la présence avec un temps de déclenchement de 5 minutes et régulation de la lumière du jour par une régulation constante de la lumière.

Dans la pratique, il existe de nombreux détecteurs de présence et de lumière du jour combinés, qui enclenchent ou déclenchent la lumière en fonction de la présence des personnes et de la lumière du jour. Actuellement, les capteurs à infrarouge passifs (PIR) sont généralement installés (comparaison dans l'illustration 2.26). De plus en plus, d'autres technologies de capteurs sont également utilisées (p.ex. à hautes fréquences ou micro-ondes). Le détecteur de présence typique a 3 possibilités de réglage:

■ **Entièrement ou semi-automatique:** Une fonction entièrement automatique, l'éclairage est enclenché ou déclenché (auto on-off); une fonction semi-automatique ne fait que déclencher automatiquement, enclencher se fait manuellement (auto-off).

■ **Temps de déclenchement:** Laps de temps entre la détection de l'absence d'une personne et le déclenchement de l'éclairage.

■ **Eclairage lumineux:** Selon le nombre de lux mesurés sur la surface de travail le capteur doit recevoir un signal de mise en marche ou d'arrêt. Cette mesure (dans un détecteur qui combine la présence et la lumière du jour) est très imprécise, car l'emplacement des capteurs est généralement optimisé pour la mesure de présence et non pour la lumière du jour.

	Valeur de l'objet	Valeur limite SIA	Valeur cible SIA
Régulation de présence	auto off	manuel	auto-on-off
Temps de déclenchement	15 minutes	–	5 minutes
Régulation selon la lumière du jour	auto off	manuel	lumière constante
Heures à pleine charge	750 h/a	1300 h/a	450 h/a
	calculé avec www.lighttool.ch	voir tableau 2.15	voir tableau 2.15

Tableau 2.21:
Grille d'évaluation pour la régulation de la lumière avec l'exemple d'une salle de classe.



Illustration 2.26:
Types de détecteurs de présence (généralement en combinaison avec un capteur de lumière du jour).

Le tableau 2.21 montre la grille d'évaluation de la régulation de l'éclairage dans une salle de classe. Les heures à pleine charge pour les valeurs limites et cibles peuvent être extraites du tableau 2.15. Les valeurs pour l'objet peuvent être calculées avec le logiciel en ligne www.lighttool.ch.

Elaboration du bilan énergétique

Les valeurs calculées pour une salle de classe type sont comparées aux valeurs de référence et un bilan énergétique avec le potentiel d'économies est élaboré (Tableau 2.22).

■ **Besoin énergétique spécifique:** Multiplication de la puissance installée par le nombre d'heures à pleine charge.

■ **Besoin énergétique:** Multiplication du besoin énergétique par la surface totale du bâtiment.

■ **Economie d'énergie:** Différence entre la valeur limite et la valeur du projet, respectivement la valeur cible et la valeur du projet.

■ **Economie des coûts d'énergie:** Economie d'énergie multipliée par le prix de l'énergie (p. ex. 20 ct/kWh).

Pour tous les locaux types, il sera procédé de manière analogue. Ce qui permet d'obtenir le bilan global et l'économie d'énergie pour le bâtiment, calculés dans les tableaux 2.23 et 2.24.

Tableau 2.22: Economie d'énergie dans une salle de classe en comparaison avec la valeur limite et la valeur cible selon la norme SIA 387/4 (exemple).

Etapes de saisie	Valeur du projet	Valeur limite SIA	Valeur cible SIA
1. Local type	Salle de classe: 72 m ²		
2. Puissance installée	16,4 W/m ²	11,0 W/m ²	7,2 W/m ²
3. Eclairage lumineux moyen	750 lux	500 lux	
4. Eblouissement	subjectif e.o.	–	–
5. Situation de la lumière du jour	moyenne	moyenne	bonne
6. Régulation de la lumière + heures à pleine charge	auto-off, 15 min. 750 h/a	manuel 1300 h/a	auto-off, 5 min. 450 h/a
Calcul	Valeur du projet	Valeur limite SIA	Valeur cible SIA
Besoin énergétique spécifique	12,3 kWh/m ²	14,3 kWh/m ²	3,2 kWh/m ²
Surface totale	Toutes les salles de classe: 372 m ²		
Besoin en énergie	4580 kWh/a	5320 kWh/a	1190 kWh/a
Économies d'énergie		–	– 3390 kWh/a
Économies des coûts d'énergie		–	env. – 680 CHF/a

Tableau 2.23: Bilan énergétique de l'éclairage pour l'ensemble du bâtiment.

Utilisation	Surface (m ²)	Valeur du projet (kWh/a)	Valeur limite SIA (kWh/a)	Valeur cible SIA (kWh/a)
Salle de classe	372	12,3	14,3	3,2
Bureau	120	15,0	17,5	2,8
Couloir	352	6,0	4,9	0,7
Autres locaux	(80)	–	–	–
Résultat total	844	10,1	10,8	2,1

Tableau 2.24: Économie d'énergie dans un bâtiment par comparaison de la valeur du projet avec la valeur limite et la valeur cible de la norme SIA 387/4.

Calcul	Valeur du projet	Valeur limite SIA	Valeur cible SIA
Besoin en énergie	8500 kWh	9100 kWh	1800 kWh
Économie d'énergie		–	– 6700 kWh
Économie des coûts d'énergie			– 1340 CHF
Économie sur 15 ans			– 20 000 CHF

2.10 Autres labels

Une large gamme de choix a considérablement augmenté les possibilités de qualifier un bâtiment par toutes sortes de labels. Le marketing, autant que la qualité, jouent à ce propos un rôle important. Le critère principal pour de nombreux labels est le quotient d'éclairage naturel moyen des espaces. D'autres critères d'évaluation et différentes approches existent également, comme le montre la vue d'ensemble. Par exemple, Minergie-Eco ne prend en compte que la quantité de lumière du jour qui pénètre dans un bâtiment; la mobilité, la manière dont le bâtiment peut être atteint, n'est pas un critère. Ainsi, en raison du manque de lumière du jour, une ville ne devrait plus être construite du tout, malgré une bonne accessibilité du public.

Principe des trois piliers (écologie, économie, qualité socioculturelle et fonctionnelle)

Comme la Suisse, en tant que membre du CEN, a accepté d'appliquer les normes EN en tant que normes nationales, ces normes doivent être prises en compte. D'autant plus qu'en cas de litige, elles sont désignées par les tribunaux comme «l'état de la technique généralement reconnu», même si rien n'a été convenu dans le contrat de construction.

En revanche, les labels et les normes de construction sont facultatives et, selon leur nature, nécessitent des mesures supplémentaires qui dépassent la simple technique. Si ces mesures sont respectées, le bâtiment sera labellisé en conséquence. Un bâtiment labellisé respecte donc généralement un standard plus élevée qu'un bâtiment sans label.

Raisons pour poser une candidature à un label:

- Attractivité, rentabilité (les locataires, firmes et organisations demandent un label)
- Mettre en évidence le potentiel de durabilité: viabilité commerciale et sécurité d'investissement
- Outil stratégique: valeurs-cibles, incitations financières, rôle exemplaire, pointe de la technique
- Instrument de communication
- Meilleures conditions hypothécaires
- Un modeste investissement supplémentaire pour une plus haute valeur immobilière
- Coûts d'exploitation réduits
- Meilleure gestion du risque
- Rendement plus élevé
- Environnement de travail et d'habitation plus sain
- Comparabilité des biens immobiliers, important, par exemple, pour les fonds immobiliers.

Cela reflète d'importantes répercussions sur le marché:

■ «Aux Etats-Unis, les bâtiments avec un certificat de durabilité atteignent des loyers supérieurs d'environ 3 % à ceux des bâtiments construits de manière conventionnelle. Les prix de vente des propriétés certifiées sont jusqu'à 16 % plus élevés que pour des bâtiments comparables.» (RICS)

■ Selon l'estimation de nombreux experts, l'intérêt pour des bâtiments durables a considérablement augmenté et continuera de croître.

■ W. Dorss (DGNB): «Les entreprises actives à l'échelle internationale exigent de plus en plus de surfaces de location durables et sont prêtes à payer plus cher pour cela».

Economie	Coûts du cycle de vie, concept d'exploitation, méthode de construction, composants, structure du bâtiment, négociabilité, valeur ajoutée régionale
Environnement	Demande en énergie primaire et bilan des gaz à effet de serre pendant la construction, l'exploitation, la mobilité; l'élimination et le recyclage des déchets; flore et faune; assurance et conservation
Société	Urbanisme et architecture; participation; construction sans obstacles; flexibilité d'utilisation; espaces de rencontre (intérieur et extérieur); sécurité subjective, bien-être; confort des locaux

Tableau 2.25: Critères principaux d'un bâtiment durable.

«Green buildings» versus «bâtiments durables»

1. Génération: «Green buildings»

■ Evaluation de la performance «verte» (accent sur l'environnement et l'énergie)

■ Certification des bâtiments basée sur une seule des trois dimensions de la durabilité (environnement).

Exemples: Minergie, CECB, Gutes Innenraumklima (GI)

2. Génération: «bâtiment durable»

■ Comprend les trois piliers de la durabilité (économie, environnement, société) (Tableau 2.25)

Exemples: BREEAM, LEED, DGNB, SNBS

qui fournit des informations sur l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment et sur l'importance des besoins énergétiques totaux. Pour cela, une utilisation standard selon la norme SIA est exigée. La demande en énergie déterminée est affichée en classes à l'aide de l'étiquette-énergie. La classification va de A à G, A étant synonyme d'une haute efficacité énergétique et G une moindre efficacité énergétique. La méthode de calcul uniforme permet une comparaison des bâtiments. Le CECB sert ainsi d'instrument supplémentaire pour une décision de location ou d'achat. L'évaluation est effectuée par des experts certifiés CECB.

CECB

Grâce au certificat énergétique cantonal des bâtiments (CECB), il existe un système d'évaluation uniforme dans toute la Suisse

Gutes Innenraumklima (GI)

«Gutes Innenraumklima» est un label lancé par un bureau privé, qui évalue la qualité de l'air ambiant des nouveaux bâtiments

CECB				
Energie				
Catégories d'évaluation	Niveaux de certification	Exigences minimales	Processus de certification	Organisation faitière
Energie	Certifié	Aucune	Prédéfini	Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK) www.geak.ch

Gutes Innenraumklima				
Qualité de l'air ambiant				
Catégories d'évaluation	Niveaux de certification	Exigences minimales	Processus de certification	Organisation faitière
Charge de pollution de l'air ambiant	Certifié	Aucune	Prédéfini	Bau und Umweltchemie AG, www.raumlufthygiene.ch

Breeam 2016 (Building Research Establishment Environmental Research Method)				
P. ex. variante du système New Construction International				
Catégories d'évaluation	Niveaux de certification	Exigences minimales	Processus de certification	Organisation faitière
<ul style="list-style-type: none"> • Energie • Santé et bien-être • Innovation • Utilisation du sol • Matériaux • Management • Pollution • Transport • Déchets • Eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Réussi • Bon • Très bon • Excellent • Remarquable 	Disponibles	Possibilité de sélection individuelle dans des limites définies	Building Research Establishment (BRE), www.breeam.com

ou des bâtiments existants rénovés. A cet effet, il définit les exigences relatives au climat intérieur, aux organismes de contrôle agréés, ainsi qu'à l'organisation et à la mise en œuvre des mesures de l'air ambiant.

Breeam

La méthode d'évaluation environnementale du british Building Research Establishment Environmental Assessment Method (Breeam) est le premier système de certification de durabilité au monde pour les bâtiments. Actuellement, ce système est appliqué dans 77 pays et possède en Europe environ 80 % du marché. Il peut être adapté aux conditions climatiques locales de l'emplacement du bâtiment.

Leed

Norme de construction écologique reconnue internationalement (Green-Building-Standard), Leadership in Energy and Environmental Design (Leed) a été développée aux Etats-Unis. Selon ses propres déclarations, elle définit une méthode de construction écologique de haute qualité pour des bâtiments plus sains, plus écologiques et plus rentables. Tout comme Breeam, Leed

est un système de certification basé sur les trois piliers de la durabilité. Le système central Leed a été développé en 1993 par le U.S. Green Building Council. Les objectifs de Leed:

- Etablissement de standards Green-Building généraux
- Promotion d'une approche de planification intégrale globale
- Reconnaissance des valeurs environnementales au sein de l'industrie de la construction
- Stimulation d'une concurrence orientée vers l'écologie
- Sensibilisation des consommateurs aux avantages d'une construction durable
- Transformation de l'industrie de la construction classique.

SNBS (Standard de Construction durable Suisse)

Le SNBS est porté par le Réseau de construction durable suisse (NNBS). La norme représente une conception généralement acceptée pour la construction durable en Suisse. La norme elle-même est disponible en tant qu'outil d'auto-évaluation, aucun certificat n'est délivré.

Leed v4 (Leadership in Energy and Environmental Design)				
P. ex. variante du système New Construction & Major Renovation				
Catégories d'évaluation	Niveaux de certification	Exigences minimales	Processus de certification	Organisation faitière
<ul style="list-style-type: none"> • Processus intégral • Localisation et transport • Emplacements durables • Utilisation rationnelle de l'eau • Energie et climat • Matériaux et ressources • Qualité environnementale intérieure • Innovation • Priorité régionale 	<ul style="list-style-type: none"> • Certifié • Argent • Or • Platine 	Disponibles	Possibilité de sélection individuelle dans des limites définies	U.S. Green Building Council (USGBC), www.usgbc.org

SNBS (standard de construction durable suisse)				
P. ex. gestion des variantes du système				
Catégories d'évaluation	Niveaux de certification	Exigences minimales	Processus de certification	Organisation faitière
<ul style="list-style-type: none"> • Société • Economie • Environnement 	Système de notes 1-6	Aucune	Possibilité de sélection individuelle dans des limites définies	Réseau de construction durable suisse (NNBS) www.nnbs.ch

Le SNBS est guidé par la stratégie du Conseil fédéral en matière de développement durable en Suisse. Il prend en compte des instruments et outils éprouvés tels que la norme SIA 112/1 «Construction durable – bâtiment», les concepts Minergie et eco-bau, mais aussi des instruments nouveaux et innovants. Par exemple, dans le domaine de l'environnement, les éléments fondamentaux existants de Minergie et de Minergie-Eco sont adoptés en ce qui concerne l'écologie du bâtiment et l'efficacité énergétique et élargis pour inclure des critères sur le climat, la nature et le paysage, la biodiversité et la mobilité.

- Évaluation globale de la construction durable, mais axée sur les points essentiels
- Intégration de la planification et de la culture de construction suisses
- Intégration d'outils et de labels suisses ayant fait leurs preuves
- Un effort mieux adapté au processus de planification pour une application propre à l'objet.

DGNB Swiss (label allemand pour les constructions durables – Suisse)

Le concept de durabilité du système DGNB poursuit une approche de certification globale et couvre les six domaines thématiques suivants: qualité écologique, qualité économique, qualité socioculturelle et fonctionnelle, qualité technique, qualité des processus et des sites. La variante suisse a été adaptée par le DGNB Suisse. Elle veille au respect des normes et brochures des labels SIA, eco-bau, société 2000 watts et d'autres instruments suisses de la construction durable.

Les évaluations sont basées sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment (existant ou nouvelle construction). Le système DGNB évalue les mesures individuelles ainsi que la performance globale d'un bâtiment, voire d'un quartier (10 points d'évaluation pour environ 50 critères). Le certificat DGNB est attribué en bronze (bâtiments existants), argent, or ou platine. Le lieu, sans influence sur le label, est évalué séparément.

DGNB v2015 (Société allemande pour des bâtiments durables)

P. ex. variante du système bâtiment administratif

Catégories d'évaluation	Niveaux de certification	Exigences minimales	Processus de certification	Organisation faitière
<ul style="list-style-type: none"> • Qualité écologique • Qualité économique • Qualité socioculturelle et fonctionnelle • Qualité technique • Processus qualité • Qualité du site 	<ul style="list-style-type: none"> • Bronze • Argent • Or • Platine 	Disponibles	Possibilité de sélection individuelle dans des limites définies	Société suisse pour un marché immobilier durable (SGNI) www.sgni.ch

Tableau 2.26: Comparaison des critères des systèmes.

Système	Énergie de fonctionnement	Energie grise	Confort / climat ambiant	Matérialisation	Coûts / rentabilité	Société / enjeux sociaux	Mobilité	Environnement
Minergie	couvert	non couvert	partiellement couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert
Minergie-P	couvert	non couvert	partiellement couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert
Minergie-A	couvert	couvert	partiellement couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert
Minergie (-P/-A) Eco	couvert	couvert	couvert	couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert
CECB	couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert
Gutes Innenraumklima	non couvert	non couvert	partiellement couvert	partiellement couvert	non couvert	non couvert	non couvert	non couvert
Breeam NC Int. 2016	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert
Leed NC v4	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert
DGNB NBV2015	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert
SNBS B/V	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert	couvert

■ couvert ■ partiellement couvert ■ non couvert

Lampes

3.1 Typologie des lampes

Il existe trois méthodes différentes pour produire de la lumière pour des lampes: les radiateurs thermiques, les lampes à décharge et les diodes lumineuses (LED). Chaque type de lampe (plus de 1000 types différents) disponible sur le marché entre dans l'une de ces trois technologies.

■ **Radiateur thermique:** Un filament est porté à incandescence. L'effet secondaire de la chaleur produit la lumière visible. Les deux principales représentantes de cette catégorie sont les lampes à incandescence et les lampes halogènes. La bougie, la lampe à gaz et le soleil sont également des radiateurs thermiques.

■ **Lampe à décharge:** Des décharges rapides (éclairs) sont successivement déclenchées entre deux pôles. La lampe à décharge fonctionne selon le principe d'un orage contrôlé. On distingue deux sous-catégories de lampes à décharge: pour les lampes fluorescentes, les «éclairs» sont ult-

raviolets et convertis en lumière visible avec un verre recouvert de substance luminescente. Les lampes économiques et les tubes fluorescents en font partie. Les lampes aux halogénures métalliques et à la vapeur de sodium ne nécessitent aucune conversion de la substance luminescente. Les lampes à décharge sont 3 à 10 fois plus efficaces que celle des radiateurs thermiques.

■ **Les diodes lumineuses sont des éléments électroniques semi-conducteurs émettant de la lumière.** Pourvu que le courant circule à travers une diode lumineuse dans le sens passant, elle émet de la lumière avec une longueur d'onde dépendante de l'élément du semi-conducteur. Ce processus correspond à celui des cellules solaires, en sens inverse toutefois. LED signifie light emitting diode (diode électroluminescente). Les lampes LED combinent les avantages du radiateur thermique et des lampes à décharge et présentent peu d'inconvénients en comparaison.

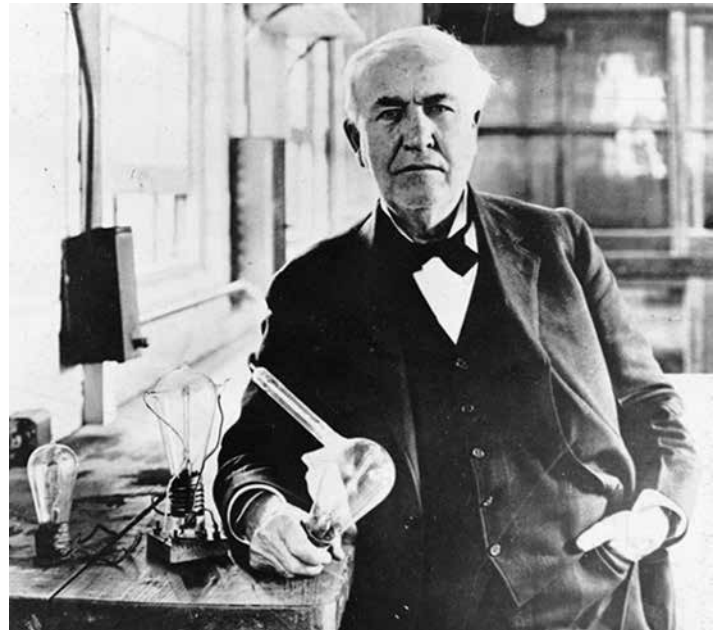
Tableau 3.1:
Des lampes à incandescence aux lampes LED Retrofit.

Critère	Lampe à incandescence	Lampe halogène	Lampe économique	LED
				
Efficacité énergétique	10 à 15 lm/W	15 à 20 lm/W	40 à 60 lm/W	80 à 160 lm/W
Durée de vie	1000 h	2000 h	6000 à 15 000 h	15 000 à 50 000 h
Cycles de commutation	illimité	illimité	3000 à 500 000	20 000 à 1 Mio.
Temps de démarrage	instantané	instantané	20 s à 180 s	instantané
Intensité variable	oui	oui	peu de modèles	nombreux modèles
Rendu des couleurs IRC	100	100	80	50 à 95
Température de surface	> 200 °C	> 200 °C	jusqu'à 50 °C	jusqu'à 40 °C
Facteur de puissance	1	1	0,5	0,3 à 0,9
Elimination	ordures ménagères	ordures ménagères	déchets spéciaux	déchets électriques
Prix d'acquisition	env. CHF 2	env. CHF 4	env. CHF 10	env. CHF 5 à CHF 10
Energie de fonctionnement (1000 lm, 10 000 heures)	750 kWh CHF 150	600 kWh CHF 120	150 kWh CHF 30	75 kWh CHF 15
Energie de fabrication	1 kWh	2 kWh à 3 kWh	2 kWh à 3 kWh	2 kWh à 3 kWh
Plage de puissance	15 W à 150 W	10 W à 120 W	3 W à 25 W	1 W à 12 W
Rendement électricité en lumière	env. 5 %	env. 7 %	20 % à 30 %	40 % à 50 %
Disponibilité	interdite	en partie interdite	difficilement disponible	1 ^{er} choix dans 90 % des cas

Les lampes à incandescence et leurs alternatives

Ces dernières années, les lampes à incandescence (complètement) et plus tard les lampes halogènes (largement) ont été interdites et retirées du marché. Les lampes économiques sont encore disponibles en partie, mais en raison de leurs inconvénients par rapport aux lampes LED, il ne reste que peu de choix dans l'assortiment des fournisseurs. Pour remplacer les lampes à incandescence, halogènes ou économiques, il ne reste plus que la variante LED. Le tableau 3.1 énumère les valeurs caractéristiques des quatre technologies de lampes.

Illustration 3.1:
Thomas Alva Edison
dans son laboratoire
de recherche
(env. 1880).



3.2 Radiateur thermique

Lampes à incandescence

La découverte évidemment la plus importante de Thomas Alva Edison (1847–1931) a été la lampe à incandescence (lampe à filament de carbone) en 1879. Le brevet de base pour la lampe de Thomas Edison, inscrit sous le n° 223.898 «Electric lamp», a été présenté le 27 janvier 1880. Avant Edison, d'autres inventeurs avaient certes déjà essayé de fabriquer des lampes à incandescence: dans les années 1850, Heinrich Göbel était déjà arrivé à fabriquer les premières lampes à incandescence à filament incandescent de carbone, sans toutefois déposer de brevet. Edison fut le premier à parvenir à fabriquer une lampe à incandescence durablement fonctionnelle et qui pouvait concurrencer la lampe à gaz. Les avantages face à la lampe à gaz étaient l'absence de scintillement et d'odeur, la faible émission de chaleur et la simplicité pour allumer et éteindre. Les premières lampes à incandescence n'ont duré que 40 heures précisément, mais déjà trois ans plus tard des lampes qui pouvaient durer 1000 heures ont été fabriquées. En 1892, Edison fusionna sa propre société Edison General Electric Company avec la «Thomson Houston Company» pour créer la «General Electric Company (GE)». GE a été pendant des dizaines d'années, avec Osram et Philips, l'une des trois entreprises dominantes au monde. Tho-

Illustration 3.2:
Plaque signalétique
dans l'hôtel del Coronado
à New York,
1888.

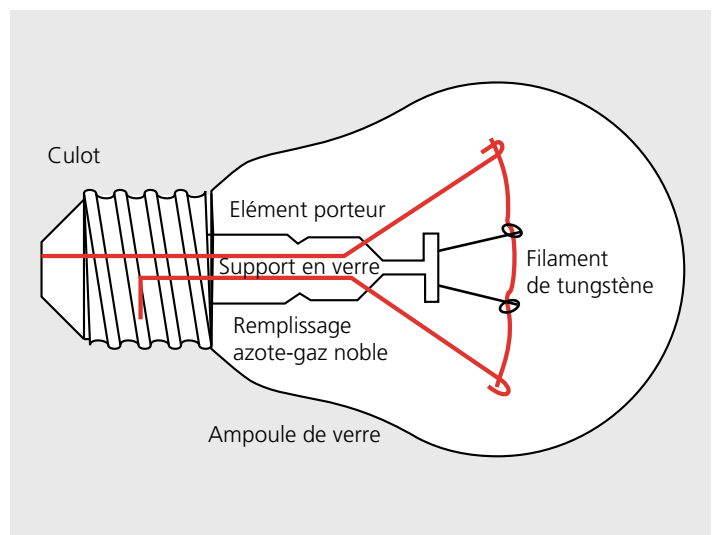
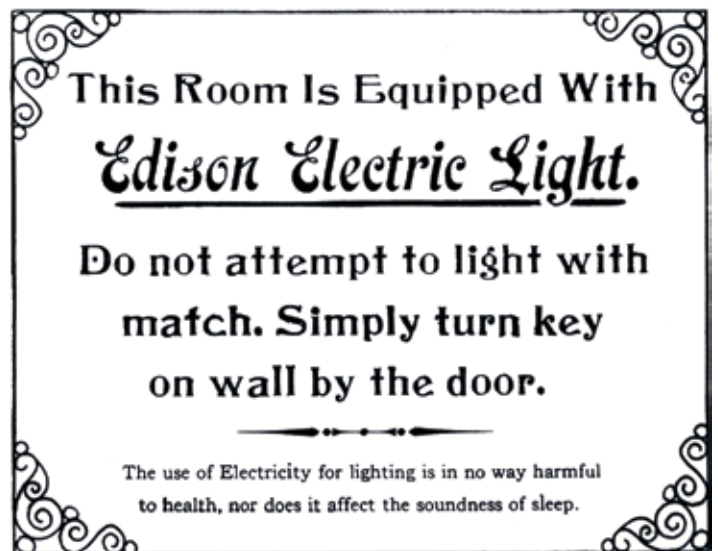


Illustration 3.3:
Structure d'une
lampe à incandescence.

mas Alva Edison est considéré comme le père des ampoules à incandescence. Aujourd'hui encore, le culot des lampes porte son nom: Culot à vis Edison E14, E27, etc.

L'héritage d'Edison

En 1888, le nouvel Hotel del Coronado, à l'ouest de la ville de New York, est équipé en éclairage électrique. Edison lui-même dut contrôler le câblage de l'hôtel. L'idée de l'éclairage électrique était si incroyable que dans chaque pièce un panneau avait été installé près des lampes à gaz (Illustration 3.2): «Cette pièce est équipée en lumière électrique d'Edison. N'essayez pas de l'allumer avec une allumette. Tournez simplement l'interrupteur sur le mur près de la porte. L'utilisation de l'électricité pour l'éclairage n'est pas nocive et ne cause pas de troubles du sommeil».

Principe de fonctionnement: Le corps lumineux existant dans le filament de tungstène en spirale est situé avec son support dans une ampoule de verre étanche, en général remplie d'un gaz inactif (la plupart du temps un mélange azote-argon). Un culot à vis avec des diamètres nominaux de 14 mm ou 27 mm permet un contact électrique et une fixation mécanique de l'ampoule de verre dans la douille. Le filament de tungstène est chauffé par «court-circuit» à une température de près de 2000°C, ce qui correspond à une température de couleur de 2700 kelvins (K). Après environ 1000 heures de fonctionnement, le filament fond. Si la tension électrique descend en dessous de 230 volts (p. ex. en mode gradation), la durée de vie augmente: à 200 volts elle est déjà de 2000 heures, toutefois la lampe à incandescence n'émet que 60 % de sa puissance lumineuse totale. En cas de surtension, la durée de vie diminue fortement.

Lampes halogènes

La dénomination correcte de la lampe halogène est lampe à incandescence halogène. C'est une amélioration de la lampe à incandescence et donc un radiateur thermique. Elle est de construction très compacte et possède par conséquent de très hautes températures de verre et de fila-

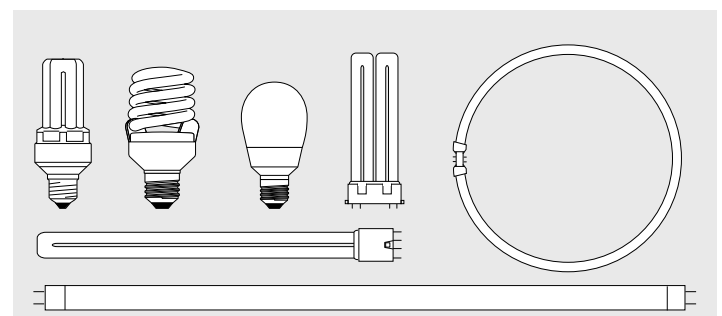
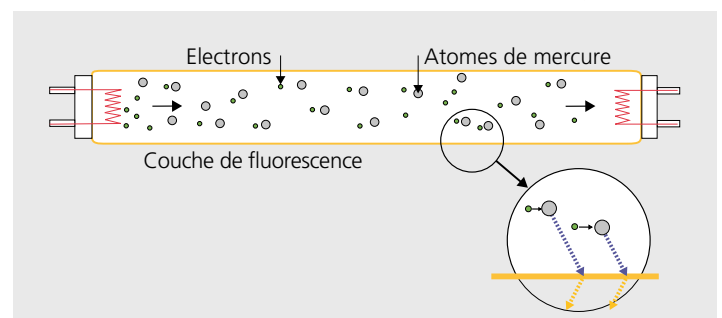
ment spiralé. Les gaz (halogènes) à l'intérieur du brûleur agissent de sorte que le filament spiralé peut être chauffé plus fortement qu'avec les lampes à incandescence, d'où une efficacité lumineuse et une température de couleur plus élevées. Les lampes halogènes supposent des douilles résistantes à la chaleur et une ampoule en verre de quartz. L'efficacité des lampes halogènes est plus élevée si l'ampoule de verre est recouverte d'un revêtement réfléchissant les infrarouges. Le rayonnement thermique est ainsi réfléchi et chauffé sur le filament de tungstène, de sorte qu'il faut moins d'énergie électrique pour l'échauffement. La lumière visible peut franchir sans perte ce revêtement infrarouge comparable au revêtement calorifuge des fenêtres. Les lampes halogènes possèdent les mêmes avantages et inconvénients que les lampes à incandescence.

3.3 Lampes fluorescentes

Les lampes à fluorescence ont été développées dans les années 1930, mais n'ont été fabriquées en nombre considérable en Europe qu'après la Seconde Guerre mondiale. Bien que sa construction de base ait à peine changé depuis, ses propriétés se sont considérablement améliorées entre-temps. En effet, son efficacité lumineuse s'élève jusqu'à 100 lm/W, sa durée de vie est d'en-

Illustration 3.4: Principe de fonctionnement d'une lampe fluorescente.

Illustration 3.5: Lampes fluorescentes typiques.



viron 10 000 heures. Ce processus d'amélioration des lampes a été possible grâce aux nouvelles substances luminescentes et à une modification de la géométrie des lampes. A partir de 1980, on a vu apparaître sur le marché des lampes fluorescentes ayant de très bonnes propriétés de rendu des couleurs (R_a 80 ou même R_a 90) ainsi que des lampes fluorescentes compactes. Quelques années plus tard, les ballasts électroniques ont amélioré la qualité lumineuse ainsi que l'efficacité lumineuse des lampes fluorescentes. Le choix des lampes compactes n'a cessé de croître. Depuis l'an 2000, il existe une nouvelle génération de lampes fluorescentes de plus petite taille (diamètre de 16 mm) qui ont été spécialement dimensionnées pour le fonctionnement des ballasts électroniques et qui permettent par conséquent un rendement supérieur à 100 lm/W, ainsi que l'utilisation de luminaires plus compacts ayant un guidage de la lumière plus précis.

Principe de fonctionnement: Dans un tube de verre rempli de mercure, les atomes sont excités par le bombardement des électrons lors du passage du courant, ce qui provoque l'émission de rayons UV. Ce rayonnement est visible sur la paroi du tube, enduite d'une couche de substance luminescente. Cette substance luminescente absorbe le rayonnement UV et le convertit en rayonnement visible. La composition spectrale de la lumière, donc la température et le rendu des couleurs, dépendent de la composition de la substance luminescente, ils sont donc variables. En Suisse, la lampe fluorescente est également appelée tube fluorescent. La désignation «tube néon» est incorrecte. Les tubes fluorescents ne contiennent pas de néon. Chaque lampe fluorescente a besoin d'un ballast qui allume la lampe et régule le courant dans celle-ci. Jusqu'en 1985 environ, il n'existait que des ballasts conventionnels lourds avec un «starter» séparé. Aujourd'hui, les ballasts électroniques se sont généralisés. Grâce à la synchronisation haute fréquence (environ 50 000 décharges par seconde), une nouvelle lampe fluorescente ne papillote pas et le confort visuel est meilleur. Les pertes sont également

moindres avec les ballasts électroniques qu'avec les dispositifs conventionnels.

Trois types de lampes fluorescentes en particulier sont en usage: les tubes fluorescents, les lampes fluorescentes compactes («tubes repliés») et les lampes économiques (lampes fluorescentes compactes avec culot à vis et ballast intégré). Pour chacun de ces trois types, il existe de nombreux modèles différents.

Applications: Les lampes fluorescentes étaient utilisées comme lampes standard dans la plupart des constructions non résidentielles (bâtiments d'infrastructure, usines, bureaux, écoles, commerces, hôpitaux). Elles sont 5 à 10 fois plus efficaces que le radiateur thermique et présentent des valeurs d'efficacité énergétique entre 50 et 100 lumens par watt. En raison de leur lumière diffuse, elles ne conviennent pas comme éclairage ciblé. En Suisse, environ 80 millions de lampes fluorescentes sont encore en service, ce qui représente 70 % de toutes les lampes.

3.4 Lampes à décharge (lampe à halogénure métallique)

La lampe à décharge à haute pression est souvent utilisée encore aujourd'hui dans l'éclairage des magasins et des halles. La lampe est caractérisée par une forme compacte, une bonne orientabilité du rayonnement et un bon rendu des couleurs. La source lumineuse, en forme de points, produit une lumière très brillante, et est aussi utilisée dans les voitures. L'utilisation d'ampoules en céramique lui assure une longue durée de vie. La lampe aux halogénures métalliques ne doit pas être confondue avec la lampe halogène courante. Ce n'est pas un radiateur thermique mais une lampe à décharge avec un haut niveau de rendement. Son prix élevé et la lenteur de sa durée d'allumage (5 à 10 minutes) sont ses principaux inconvénients. La lampe à haute pression est souvent utilisée dans les spots avec lumière combinée. Ceci est possible parce qu'elle possède un très petit brûleur (tube à décharge) et donc un arc intense. Mieux vaut éviter de la regarder directe-



Illustration 3.6: Lampe à halogénure métallique 35 watts, 3300 lumens (longueur: env. 10 cm).

Type de lampe	Puissance (W)	Flux lumineux (lm)	Puissance du système (W)	Efficacité lumineuse (lm/W)	Longueur (mm)	Culot
Tube type T16 (diamètre 16 mm)	14	1350	17	79	549	G5
	21	2100	24	88	849	G5
	28	2900	32	91	1149	G5
	35	3650	39	94	1449	G5
	24	2000	26	77	549	G5
	39	3500	43	81	849	G5
	49	4900	55	89	1449	G5
	54	5000	60	83	1149	G5
	80	7000	88	80	1449	G5
Tubes type T26 (diamètre 26 mm)	18	1350	19	71	590	G8
	36	3350	36	93	1200	G8
	58	5200	55	95	1500	G8
Circline type TC-C	22	1800	26	69	225	2GX13
	40	3200	45	71	299	2GX13
	55	4200	61	69	299	2GX13
Lampe compacte à tube triple type TC-T	13	900	14	64	90	GX24q-1
	18	1200	19	63	100	GX24q-2
	26	1800	27	67	115	GX24q-3
	32	2400	36	67	131	GX24q-3
	42	3200	47	68	152	GX24q-4
	57	4300	63	68	195	GX24q-5
	70	5200	76	68	235	GX24q-6
Lampe compacte à tube double type TC-D	10	600	12	50	87	G24q-1
	13	900	14	64	115	G24q-1
	18	1200	18	67	130	G24q-2
	26	1800	27	67	149	G24q-3
Lampe compacte à tube simple type TC-L	7	400	9	44	114	2G7
	9	600	12	50	144	2G7
	11	900	14	64	214	2G7
	18	1200	19	63	217	2G11
	24	1800	27	67	317	2G11
	36	2900	39	74	411	2G11
	40	3500	45	78	533	2G11
	55	4800	61	79	533	2G11
	80	6500	86	76	565	2G11
	16	1600	18	89	317	2GX11
	22	2200	25	88	411	2GX11
	26	2600	29	90	533	2GX11
	28	2800	31	90	565	2GX11
	Lampe fluocompacte type TC-F	18	1100	19	58	122
24		1700	27	63	165	2G10
36		2800	39	72	217	2G10
Lampes écono- miques	5	270	5	54	env. 100	E14/E27
	7	380	7	54	env. 110	E14/E27
	11	640	11	58	env. 120	E14/E27
	14	820	14	59	env. 130	E27
	18	1140	18	63	env. 150	E27
	22	1440	22	65	env. 180	E27

Tableau 3.2:
Aperçu des princi-
pales lampes fluo-
rescentes.

ment en raison de son format compact et de la luminosité intense qui s'en dégage. Son fonctionnement nécessite un ballast comme pour toutes les lampes à décharge.

3.5 Mesure des lampes

Le flux lumineux d'une lampe se mesure avec la sphère d'Ulbricht. Le photogoniomètre permet de mesurer tant le flux lumineux que la distribution spectrale.

La sphère d'Ulbricht

Friedrich Richard Ulbricht de Dresde a découvert la sphère qui porte son nom vers 1900. Il s'agit d'une sphère creuse peinte en blanc mat à l'intérieur, d'un diamètre de 1 à 3 mètres, qui sert à évaluer le flux lumineux total d'une source lumineuse suspendue en son milieu. La lumière diffusée par la source lumineuse est réfléchiée plusieurs fois sur la surface de la sphère, de

sorte que le rayonnement répandu est presque idéalement diffus. Dans la surface de la sphère, il y a une petite ouverture dans laquelle est installée une vitre en verre dépoli. La luminance sur cet élément vitré est proportionnelle au flux lumineux total. La luminance se mesure avec un capteur de lumière. Pour pouvoir mesurer uniquement le flux lumineux total provenant d'une source lumineuse, la sphère intégrante est adéquate.

Pour mesurer l'intensité lumineuse dans les différents sens de rayonnement, un photogoniomètre est plus adéquat que la sphère.

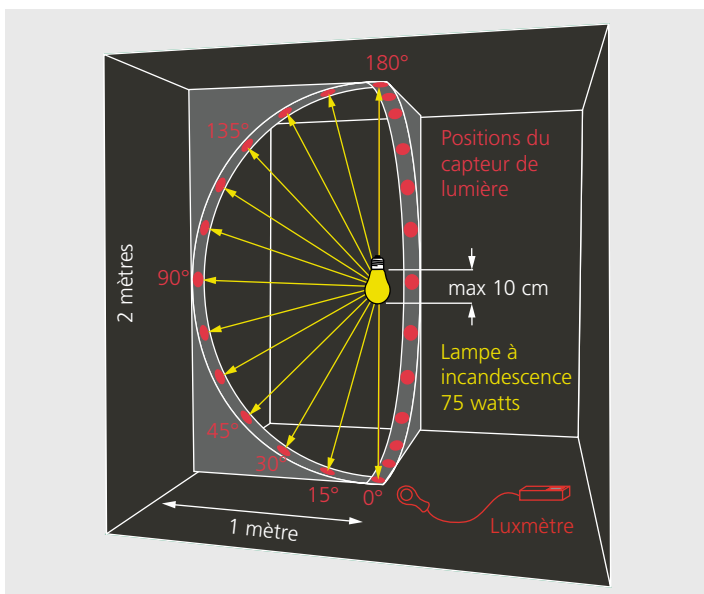
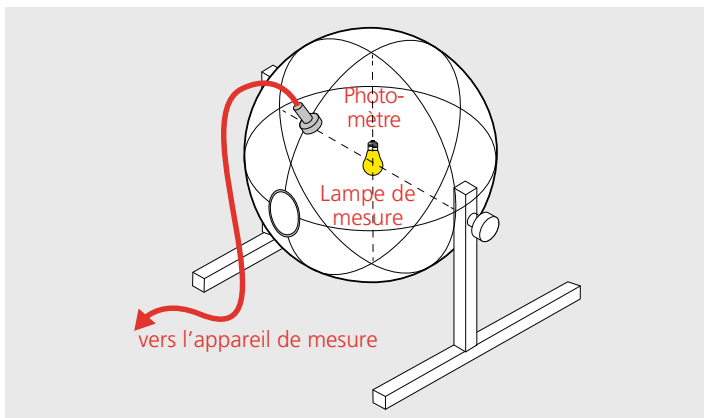
Photogoniomètre

Avec le photogoniomètre, l'intensité lumineuse d'une source lumineuse est mesurée dans toutes les directions. La somme de toutes les intensités lumineuses sur l'ensemble du local est égale à la quantité de lumière. Pour la mesurer, un capteur de lumière tourne autour de la source lumineuse selon un quadrillage angulaire donné et fournit, suivant la résolution de mesure, jusqu'à 1752 points de mesure, soit des valeurs d'intensité lumineuse. A partir des valeurs mesurées, on enregistre la courbe de répartition lumineuse de la source lumineuse dans l'espace. Dans la pratique, on représente une coupe longitudinale et une coupe transversale de la distribution spectrale. Pour obtenir des mesures très précises, il faut satisfaire à des conditions strictes:

- Le local est très noir et non réfléchissant.
- La température de l'air ambiant est maintenue à 25°C avec une petite variation.
- La lampe ou le luminaire peuvent être tournés à la verticale et non à l'horizontale.
- La distance entre la source lumineuse et le capteur doit être au moins 10 fois plus grande que la surface lumineuse de la source. Pour la mesure de sources lumineuses de plus grand format et au rayonnement asymétrique (p.ex. luminaires avec tubes fluorescents), l'exigence de distance implique de très grands locaux à mesurer pour lesquels le respect des autres conditions est très contraignant. Depuis quelques années, la condition de distance peut

Illustration 3.7:
Sphère d'Ulbricht.

Illustration 3.8:
Structure simple
d'un goniomètre
pour la mesure
d'une lampe.



être réduite grâce à des capteurs de lumière très précis et à l'informatique. La mesure peut ainsi être effectuée dans un local relativement petit avec le goniomètre en champ proche.

Construction et utilisation d'un goniomètre simple

Pour mesurer de manière simple de petites sources lumineuses (corps lumineux de moins de 10 cm) avec une précision raisonnable, le dispositif de l'illustration 3.8 qui correspond à un mini-goniomètre peut être utilisé.

■ Un local sombre, non réfléchissant (au moins 2 m sur 2 m sur 2 m).

■ Un demi-cercle (ou 2, l'un pour la mesure longitudinale et l'autre pour la mesure transversale) d'un rayon de 1 mètre (semblable à la demi-boucle d'un circuit automobile miniature) monté à la verticale.

■ Une installation de montage pour la lampe au milieu de la «boucle». Si possible, sans que le flux lumineux ne soit ombragé par la fixation!

■ Un raccordement électrique pour la lampe.

■ Des points de fixation pour le capteur du luxmètre avec un espacement angulaire de 15°. Important: les points de fixation sont placés exactement à angle droit avec le centre de la lampe.

■ Pour une distance de mesure de 1 mètre entre la source lumineuse et le capteur lumineux, l'intensité lumineuse en candela (cd) correspond à l'éclairement lumineux en lux (lx).

Mesure en 6 étapes

1. Mesure des éclairagements lumineux à chacun des points de mesure établis, 13 sur l'illustration avec un espacement angulaire de 15°.

2. Orientation de la source lumineuse ou du goniomètre de 90° par rapport à l'axe vertical et mesure des éclairagements lumineux pour tous les angles de 15° dans le sens transversal.

3. Calcul des moyennes des valeurs mesurées dans le sens longitudinal et transversal.

4. Calcul des moyennes des valeurs en lux pour les 12 angles intermédiaires, donc compris entre 0 et 15° → 7,5°, entre 15° et 30° → 22,5°, etc. jusqu'à 172,5°.

Etape	Valeurs de mesure			Calcul		
	1	2	3	4	5	6
Angle	Eclairement lumineux transversal (lx)	Eclairement lumineux longitudinal (lx)	Moyenne (lx)	Moyenne avec correction d'angle (lx)	Surface éclairée (m ²)	Flux lumineux (lm)
0°	0	0	0			
15°	55	57	56	28	0,21	6
30°	66	70	68	62	0,63	39
45°	83	81	82	75	1,00	75
60°	83	83	83	83	1,30	107
75°	79	77	78	81	1,52	122
90°	75	75	75	77	1,63	124
105°	77	79	78	77	1,63	124
120°	77	79	78	81	1,52	122
135°	83	83	83	85	1,30	111
150°	86	88	87	88	1,00	88
165°	87	91	89	89	0,63	56
180°	86	87	88	87	0,21	19
	85	87	86			
				Total	12,56	993

Tableau 3.3: Calcul du flux lumineux total d'une lampe à incandescence 75 W à partir de 26 valeurs lux mesurées.

5. Pour chaque angle intermédiaire: calcul de la part de la surface éclairée de la sphère. $2\pi \cdot [\cos(\alpha_1 / 180 \cdot \pi) - \cos(\alpha_2 / 180 \cdot \pi)]$. $\pi = \text{constante} = 3,1416$, p. ex. pour $7,5^\circ$: surface = $2 \cdot 3,14[\cos(165/180 \cdot 3,14) - \cos(180/180 \cdot 3,14)] = 0,21 \text{ m}^2$.

La somme de toutes les surfaces partielles donne la surface de la sphère du cercle d'unité de rayon 1 mètre. En travaillant avec les angles de 15° donnés, ces valeurs ne doivent pas être recalculées.

6. Pour chaque angle intermédiaire: Calcul de la part de flux lumineux. Eclairage lumineux multiplié par la surface, par exemple $7,5^\circ$: $28 \text{ lx} \cdot 0,21 \text{ m}^2 = 6 \text{ lumens (lm)}$. La somme de tous les flux lumineux donne le flux lumineux total de la source lumineuse.

3.6 Lampes économiques

Les lampes économiques sont des lampes fluorescentes compactes avec un dispositif de fonctionnement intégré et un culot à vis ou à baïonnette pour le raccordement direct au réseau secteur de 230 volts. Les lampes économiques sont une forme de lampes fluorescentes. Elles existent dans des puissances comprises entre 3 et 25 watts environ. Les exigences techniques pour les lampes économiques jusqu'à 25 watts étant moindres que pour les puissances supérieures, ce sont donc surtout les lampes économiques à faible puissance en watts qui sont utilisées.

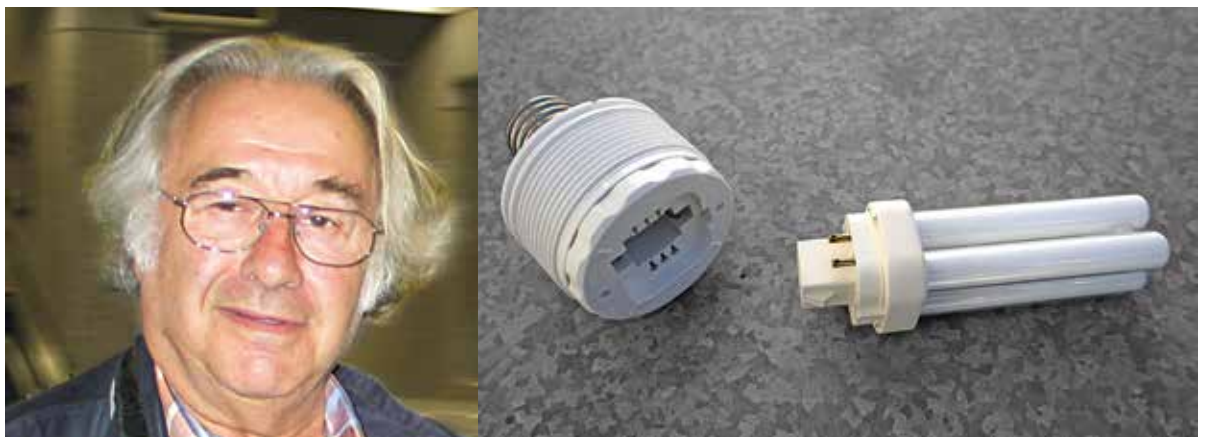
L'inventeur de la lampe économique

Souvent, la découverte d'un produit n'est pas évidente. Edison a certes introduit la première lampe à incandescence (vers 1880) sur le marché et l'a faite breveter, mais la première lampe à incandescence qui fonctionnait avait été inventée par Heinrich Göbel (vers 1850).

Il est encore plus difficile à première vue de dire qui a inventé la lampe économique. Déjà dans les années 1920, si on avait réussi à produire de la lumière économique grâce à la décharge des gaz et au revêtement fluorescent, c'était avec une très mauvaise qualité lumineuse. Vers 1980, Philips a commercialisé la première lampe fluorescente compacte avec transformateur intégré et culot à vis. Elle était conçue pour remplacer les lampes à incandescence dans des cas particuliers et fut appelée lampe en pot de confiture en raison de sa forme et de sa taille.

L'inventeur Jürg Nigg, a fabriqué et breveté en 1984 la première lampe économique de qualité dans sa société Acrotronic: démarrage immédiat, pas de papillonnement et de scintillement, longue durée de vie, masse compacte et légèreté la caractérisent. Les bâtons lumineux se séparaient des adaptateurs (culot avec électronique intégrée), plusieurs intensités lumineuses pouvaient donc être choisies avec le même adaptateur, dont la durée de vie en a fait un argument écologique. L'industrie a copié la lampe de Nigg, renonçant à la séparation du bâton lumineux et de l'adaptateur pour des raisons économiques.

Illustration 3.9: Jürg Nigg et son invention, l'adaptateur pour lampes économiques (www.arcotronic.ch).



LED – diodes électroluminescentes

4.1 Objectifs de performance des LED

Les diodes électroluminescentes (LED) sont des éléments semi-conducteurs dont on connaît le mode de fonctionnement grâce à l'électrotechnique et à l'informatique. Les LED utilisent le même effet physique que les cellules solaires, en sens inverse toutefois: la lumière (du soleil) est transformée en courant continu tandis que la LED transforme le courant continu en lumière. Les LED rouges ont été inventées aux alentours des années 1960 et utilisées comme voyants lumineux dans les horloges et autres appareils. Dix ans plus tard, les LED verte et jaune voient le jour et ce n'est que dans les années 1990 que les LED bleues sont apparues sur le marché. Vers l'an 2000, avec un revêtement fluorescent, de la lumière blanche de bonne qualité a pu être produite à partir d'une LED bleue. Les bases ont ainsi été posées pour l'éclairage aux LED dans les locaux.

Aujourd'hui dans la pratique, l'efficacité énergétique des LED atteint au moins le niveau de la lampe économique avec plus de 100 lm/W, déjà deux fois plus efficace que les lampes fluorescentes conventionnelles. Les meilleures lampes LED atteignent jusqu'à 160 lm/W. Leur développement n'est pas encore terminé, dans les prochaines années l'efficacité lumineuse

atteindra jusqu'à plus de 200 lm/W avec des LED blanches. La technologie des LED révolutionne l'éclairage, ce qui devrait être comparable avec le remplacement du disque de vinyle par le CD.

Tendances

Les tendances dans le domaine de l'éclairage vont être complètement déterminées par les LED, dans les prochaines années.

- L'efficacité énergétique va encore augmenter pour parvenir à plus de 200 lumens par watt.

- Grâce à la technologie LED, les possibilités de régulation de l'éclairage vont fortement augmenter, car les LED, contrairement à la technologie des tubes fluorescents, peuvent être piloté rapidement et facilement.

- L'utilisation extensive de la technologie des capteurs apporte une contribution supplémentaire à l'augmentation de l'efficacité, tout comme l'augmentation de l'efficacité des lampes et des luminaires à LED.

Prix Nobel de physique pour la découverte des LED

La percée vers la technologie LED d'aujourd'hui est basée sur la découverte de la LED bleue en 1993. Vingt ans plus tard, le 7 octobre 2014, deux scientifiques japonais, Isamu Akasaki et Hiroshi Amano et l'américain Shuji Nakamura, reçoivent le

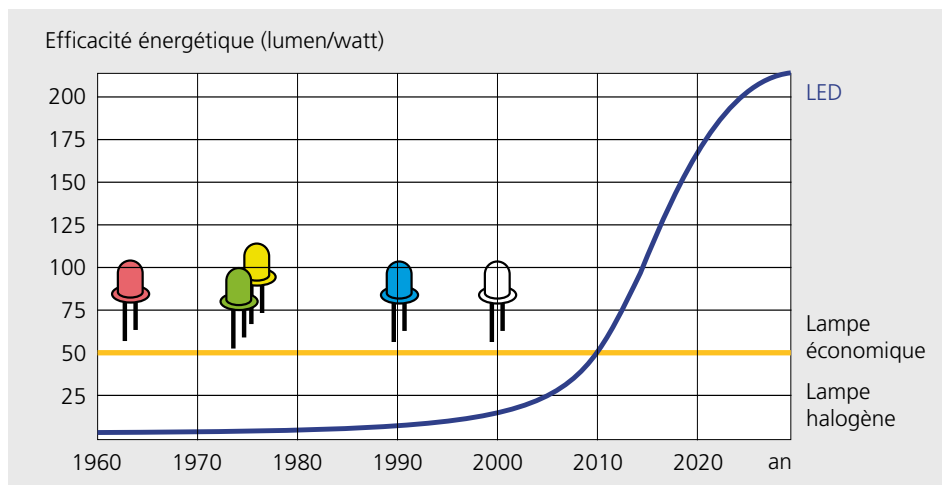


Illustration 4.1: Evolution de l'efficacité énergétique des diodes lumineuses.

prix Nobel de physique pour la découverte des LED – diodes électroluminescentes.

Le Comité du Prix Nobel leur a décerné le prix pour le développement de diodes émettant de la lumière bleue. Ces diodes électroluminescentes bleues (LED) sont les précurseurs de la LED blanche. Étant donné qu'un quart de l'électricité mondiale est utilisé pour l'éclairage, des sources lumineuses LED économes en énergie aideraient à conserver les matières premières, a expliqué l'Académie suédoise des sciences. Le Comité Nobel a ainsi rendu hommage, selon ses propres termes, à la recherche «révolutionnaire» de nouvelles sources lumineuses économes en énergie et respectueuses de l'environnement.

LED organique (OLED)

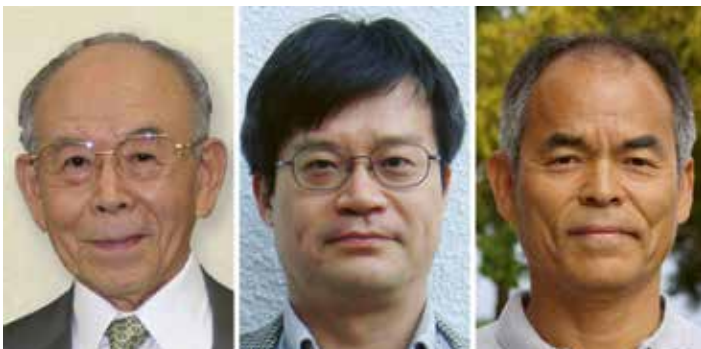
En plus de la technologie classique des LED, des travaux de recherche concernant les OLED sont en cours. Les OLED présentent des avantages mais également des inconvénients face aux LED cristallines:

■ **Avantages:** Moins de besoin en matériaux, lumière étendue sur des plaques minces

■ **Inconvénients:** Rendement plus faible, durée de vie plus courte.

A l'avenir, il sera possible d'acheter une lumière OLED sous la forme de rouleaux de papier peint éclairant et d'en tapisser les murs et les plafonds. Mais la réalisation de cette vision devra attendre encore un peu. Les OLED actuelles mesurent environ 10 cm sur 10 cm et ont une efficacité lumineuse qui, avec 50 à 80 lumens par watt, se situent clairement derrière une LED standard.

Illustration 4.2:
Les trois inventeurs
du LED bleu,
Akasaki, Amano et
Nakamura.



Métaux de terres rares

Les métaux de terres rares sont utilisés dans de nombreux appareils techniques et électroniques, notamment dans les lampes économiques, les LED, les téléviseurs, les écrans LCD et plasma, les batteries, les piles à combustibles, les pots catalytiques, les filtres à particules de suie, les appareils à rayons X, le laser, les câbles de fibre optique, les aimants, les moteurs électriques, les moteurs d'avion, les réacteurs atomiques. L'abréviation souvent utilisée «terres rares» au lieu de «métaux de terres rares» est équivoque. Ce nom vient de l'époque de la découverte de ces éléments et repose sur le fait qu'ils ont d'abord été découverts dans les minéraux rares et qu'ils en ont été isolés sous forme d'oxydes (autrefois appelés «terres»). Les éléments chimiques du 3^e groupe du tableau périodique suivants font partie des métaux de terres rares: scandium (numéro atomique 21), yttrium (39), lanthane (57), cérium (58), praséodyme (59), néodyme (60), prométhium (61), samarium (62), europium (63), gadolinium (64), terbium (65), dysprosium (66), holmium (67), erbium (68), thulium (69), ytterbium (70) et lutécium (71).

En 2017, la production mondiale s'est élevée à 130 000 tonnes, dont 105 000 tonnes ont été produites en Chine, qui domine ainsi le marché. Compte tenu de l'intensité minière actuelle, les réserves devraient durer environ 1000 ans.

L'exploitation des terres rares est très coûteuse. Les métaux sont nettoyés dans des fosses avec de l'acide. La boue, ainsi polluée, garde des résidus causant des dommages considérables à l'environnement.

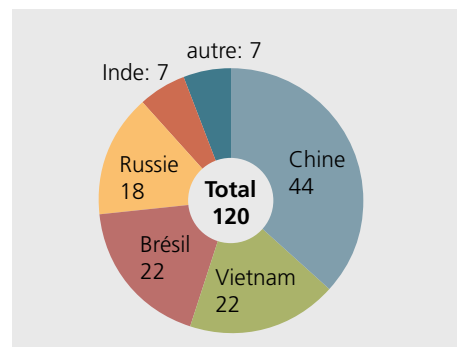


Illustration 4.3:
Estimation des réserves de terres rares (en millions de tonnes).

4.2 Caractéristique des LED

Par rapport aux sources lumineuses précédentes, les diodes électroluminescentes présentent de nombreux avantages, qui les rendent encore plus intéressantes – en particulier grâce à leur grande efficacité énergétique.

■ **Pas de chaleur résiduelle infrarouge et pas d'ultraviolets dans le rayonnement lumineux:** Ces qualités sont un grand avantage dans les magasins et les musées surtout, les marchandises et les pièces d'exposition éclairées ne sont donc pas affectées.

■ **Type de construction compacte:** Permet le développement de modèles de lampes et de luminaires filigranes qui peuvent être utilisés dans un espace très réduit.

■ **Longue durée de vie:** Grâce à une durée de fonctionnement moyenne de 2000 heures par an, les lampes LED peuvent remplir leur fonction pendant 20 à 30 ans. Une bonne qualité des composants et un refroidissement suffisant sont le gage d'une longue durée de vie.

■ **Démarrage immédiat:** Contrairement aux tubes fluorescents, les lampes LED diffusent leur pleine quantité de lumière immédiatement après l'allumage.

■ **Bonne gradabilité:** L'intensité de la plupart des lampes LED peut être réglée. Contrairement à toutes les autres sources lumineuses, les LED ne perdent pas en efficacité lors de la gradation. Quelques modèles sont même plus efficaces en charge partielle.

■ **Modulation des couleurs:** La modulation des couleurs est une caractéristique spéciale des LED. En principe, n'importe quelle couleur souhaitée peut être produite, que ce soient les tons blancs (blanc chaud, blanc froid) ou des couleurs vives comme le rouge, le vert et le bleu. Pour les luminaires LED coûteux, la température de couleur n'est pas prédéfinie à l'usine et peut être choisie par commande à distance ou via un smartphone.

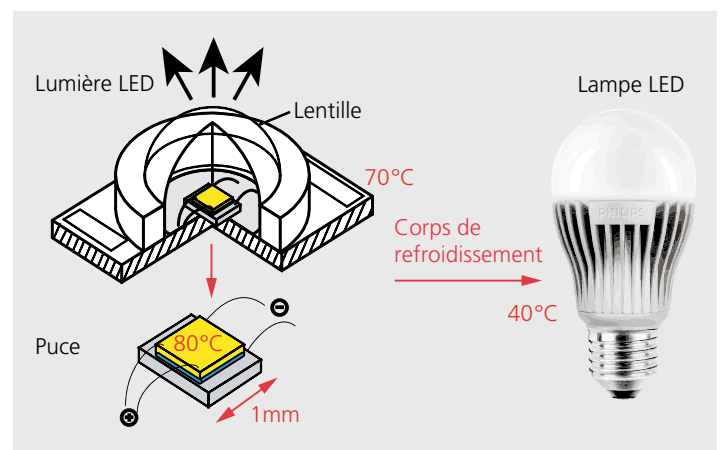
Durée de vie élevée

La longévité est l'avantage le plus mentionné pour la LED, ce qui la rend compétitive face aux autres sources lumineuses. La durée de vie est donc un critère clé, mais également un défi en matière de design et de fabrication d'une lampe ou d'un luminaire LED. Certes, les modules LED actuels atteignent une durée de vie type de 30 000 à 100 000 heures, toutefois uniquement lorsque la gestion de la température est exacte et que le dispositif de fonctionnement nécessaire est constitué de bons composants.

L'émission de chaleur et la durée de vie vont de pair pour la LED: si la température de la puce dépasse une certaine limite (p. ex. 80 °C selon le modèle), la durée de vie diminue fortement. Le recul de la durée de vie signifie pour les diodes lumineuses une diminution continue de la diffusion de lumière. En règle générale, une durée de vie de 50 000 heures signifie une baisse de la quantité de lumière de 30 %. Quant à la durée de vie d'une source LED, il n'y a pas de définition unique ou usuelle établie, que ce soit une durée d'utilisation «nominale» ou «économique».

Au lieu de cela, il est courant de montrer la «durée de vie nominale moyenne», qui se réfère à un degré spécifié de dégradation du flux lumineux. La désignation L70 signifie, par exemple, que la source LED en question ne produira que 70 % de son flux lumineux nominal (à neuf) après 50 000 heures d'utilisation.

Illustration 4.4: La gestion thermique et la qualité de l'appareil déterminent la durée de vie.



Pour que la lampe LED ne surchauffe pas, elle a besoin d'un refroidisseur. Celui-ci doit évacuer la chaleur qui est générée sur la partie arrière de la puce. Sur la partie avant, dans le faisceau lumineux, il n'y a pas de chaleur! La puce d'une LED de 1 watt de puissance possède une surface d'environ 1 mm². Cette petite surface atteint 80°C et plus. Pour évacuer la chaleur, une surface refroidissante de plusieurs centimètres carrés est nécessaire. On reconnaît aisément qu'une lampe LED de 5, 10 ou 30 watts nécessite une plus grande surface métallique afin que la puce ne surchauffe pas. Lorsque les diodes lumineuses sont directement intégrées dans un luminaire, le corps métallique du luminaire est idéal pour évacuer cette chaleur. Pour les spots compacts ou les lampes Retrofit, des ailettes de ventilation doivent être prévues à cet effet.

En plus de l'émission de chaleur, la qualité du dispositif de fonctionnement est également essentielle pour une longue durée de vie. De très petits dispositifs de fonctionnement (dans les petites lampes) sont fondamentalement plus sujets à panne que les grands. Finalement, cela dépend des différents éléments et de leur traitement. De l'extérieur, on ne peut pas voir si le dispositif de fonctionnement de la lampe est bon. On est donc dépendant de la fiabilité du fournisseur ou des marques du produit (Illustration 4.4).

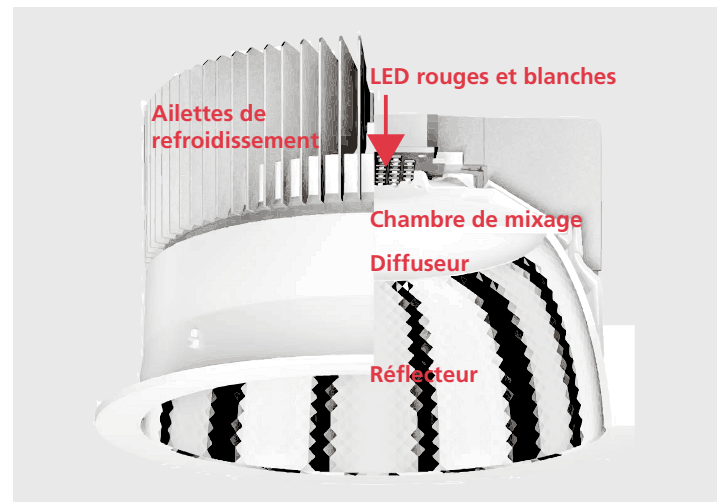
Modulation des couleurs pour les LED

Une excellente propriété de la diode lumineuse est son aptitude à produire une température de couleur quelconque sans utiliser pour cela de filtre générant une

perte. La modulation des couleurs est particulièrement intéressante lorsqu'il s'agit de produire différents tons de blanc. Certes le blanc, comme toutes les autres couleurs, est obtenu à partir du mélange des couleurs primaires rouge, vert et bleu (RVB). Mais lorsqu'un bon rendu des couleurs est demandé, le mélange RVB ne suffit plus. Pour un mélange des couleurs de grande qualité, on utilise la plupart du temps des LED blanc froid comme base. Elles sont associées à des LED jaunes ou rouges et la lumière de la LED de plusieurs couleurs différentes est mélangée par le biais d'un diffuseur. Les différentes commandes de la luminosité des LED blanches et de couleur génèrent différents tons de blanc avec un indice de rendu des couleurs élevé. Ce procédé est surtout appliqué dans la pratique pour les spots et les downlights. Avec ce système PAL (Perception Adaptive Lightsource) de Regent, tous les tons de blancs compris entre 2700 et 6500 kelvins peuvent être produits avec le procédé décrit pour une qualité de rendu

Illustration 4.5: Section du «Panos Infinity» de Zumtobel avec la technique Cree-True-White.

Illustration 4.6: Lumière LED chaude, blanc neutre et blanc froid provenant du même luminaire (Technique PAL, Regent).



des couleurs invariablement élevée avec une seule source lumineuse. Au moyen d'un simple bouton-poussoir, les couleurs peuvent être modifiées à tout moment. Si par exemple des vêtements bleus sont vendus dans un magasin de mode, alors le spot LED sera réglé sur blanc froid, ce qui a pour conséquence un éclairage intense des couleurs bleues. Si des chaussettes rouges sont mises en valeur, alors le spot LED sera réglé sur blanc chaud.

Le spot LED de couleur variable est également intéressant pour le commerce alimentaire. Ainsi, les différents étalages peuvent être mis en valeur avec différentes couleurs: un fromage avec une couleur jaune, du pain avec du marron, de la viande en rouge et du poisson avec du rose-bleuté. Cette manipulation chromatique des sources lumineuses destinée à la promotion des ventes n'est pas récente, mais on a dû jusqu'ici utiliser des filtres spéciaux qui absorbaient beaucoup de lumière. Avec la LED, cela fonctionne sans filtre et sans perte d'efficacité (Illustration 4.6).

Une autre application intéressante permet, par le mélange de LED blanc froid et rouge, de produire avec efficacité une lumière blanc chaud. En général, les LED blanc chaud sont moins efficaces que les blanc froid (en raison de leur revêtement fluorescent «plus épais»). Si on mélange dans un diffuseur une lumière LED blanc froid efficace avec une lumière LED rouge tout aussi efficace, alors on obtient une lumière blanc chaud de grande qualité et de grande efficacité aussi. C'est l'exemple des downlights «Panos Infinity» de la société Zumtobel: les luminaires blanc chaud atteignent, avec un maximum de 115 lm/W et un très bon indice de rendu des couleurs, une efficacité énergétique deux fois plus élevée que le downlight avec des lampes fluorescentes compactes (Illustration 4.5).

4.3 Qualité de lumière et rendu des couleurs

Rendu des couleurs

L'évaluation de la qualité lumineuse et chromatique des sources lumineuses se modèle sur les critères de spectre visible, de température de couleur, d'espace chromatique et d'indice de rendu des couleurs.

Pour les lampes à incandescence, la température de couleur est conditionnée physiquement et ne peut être modifiée. Pour les lampes fluorescentes, la température de couleur peut être variable mais de manière clairement standardisée. Par contre, l'offre est infinie pour les lampes LED. Chaque lampe LED diffuse une autre lumière, que ce soit en termes de couleur, de température de couleur ou de spectre visible. Ce qui fait du remplacement d'une lampe hors service un vrai défi, si une lumière homogène (blanche!) est souhaitée et non pas un éclairage du genre sapin de Noël. L'aspect chromatique revêt par conséquent une importance capitale lors de l'utilisation de LED.

Spectre chromatique

Les différentes sources lumineuses auxquelles les personnes sont exposées ont des compositions de couleur différentes. Certes, ces combinaisons sont perceptibles comme lumière blanche, mais avec de grandes différences. Si on analyse ces sources lumineuses avec un spectrophotomètre, ces différences seront mises en évidence. Dans le spectre chromatique des illustrations 4.7 et 4.11, la courbe V-Lambda est superposée, ce qui indique la sensibilité de l'œil humain aux différentes couleurs.

■ La lumière du jour a un spectre chromatique complet: toutes les couleurs allant du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune sont présentes. La part de bleu domine (Illustration 4.7).

■ La lumière de la lampe à incandescence est quasi le contraire de la lumière du jour: elle possède certes un spectre chromatique complet, mais la part de rouge domine (Illustration 4.8).

■ La lumière émise par les lampes économiques (et toutes les autres lampes à décharge) possède un spectre chromatique complet. Les couleurs primaires sont certes présentes, mais les différents tons intermédiaires sont faibles ou pas du tout visibles. Pour les applications professionnelles, il existe également des lampes fluorescentes dont le spectre ne présente que des petits vides. Ces lampes se reconnaissent avec un meilleur indice de rendu des couleurs de 90 au lieu de 80 pour les lampes économiques normales (Illustration 4.9).

■ La lumière LED est meilleure que celle de la lampe économique, son spectre est complet. Toutes les lampes LED possèdent cependant un «trou dans le spectre» entre le bleu et le vert. Cela vient de la transformation de la LED bleue en lumière blanche visible au moyen de substances luminescentes. Plus ce trou est petit, meilleur est le rendu des couleurs de la lampe LED (Illustrations 4.10 et 4.11).

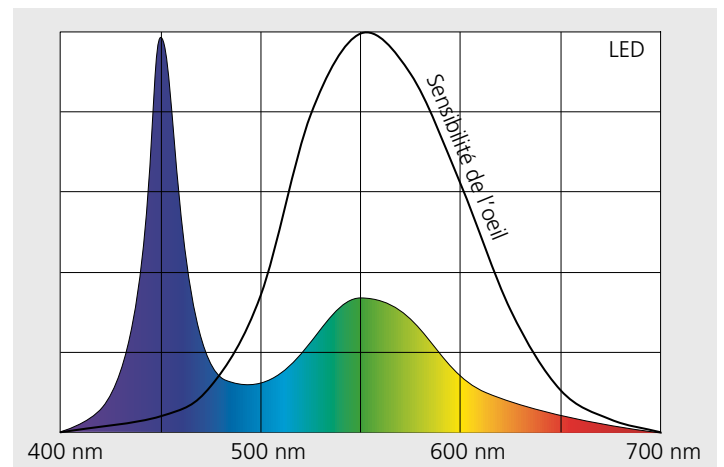
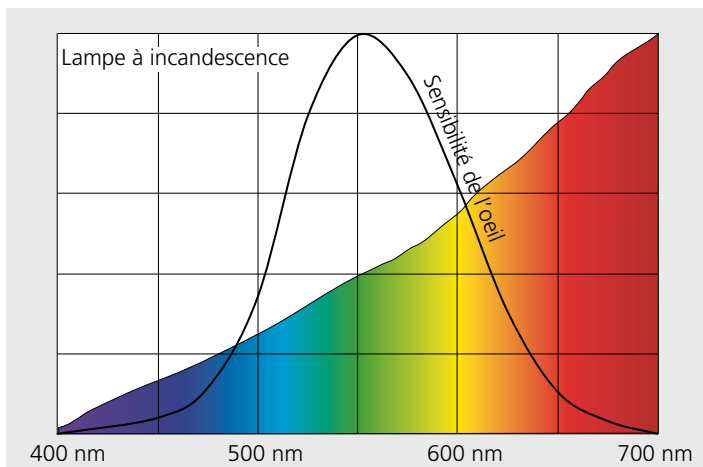
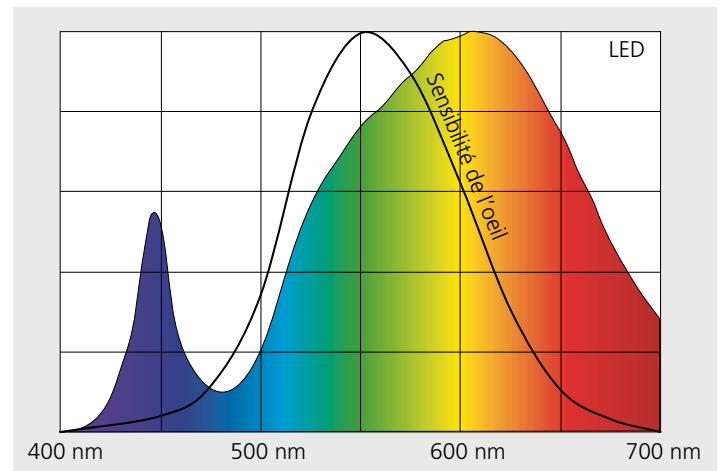
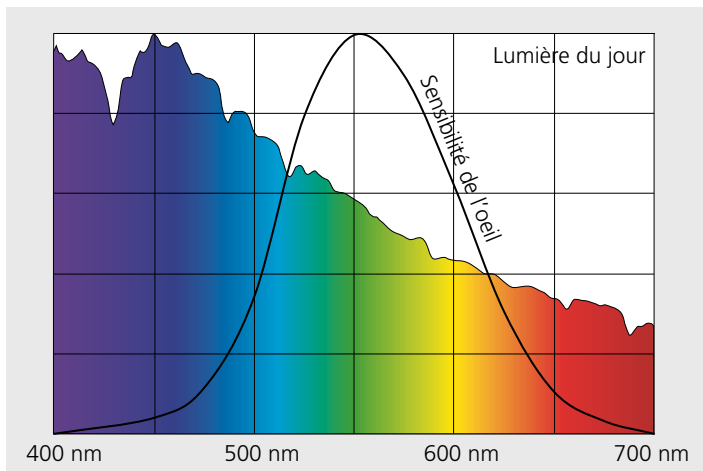
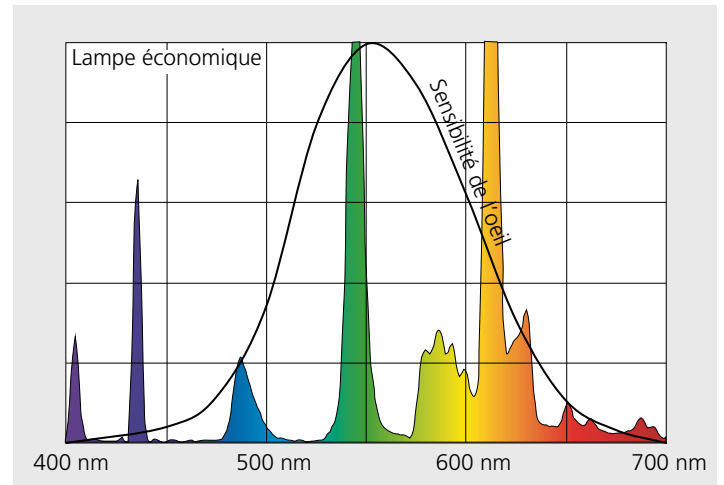
Illustration 4.7 (en haut): Spectre chromatique de la lumière du jour.

Illustration 4.8 (en bas): Spectre chromatique d'une lampe à incandescence.

Illustration 4.9 (en haut): Spectre chromatique d'une lampe économique usuelle.

Illustration 4.10 (au milieu): Spectre chromatique d'une bonne lampe LED (IRC = 90).

Illustration 4.11 (en bas): Spectre chromatique d'une mauvaise lampe LED (IRC bas).



Température de couleur

La température de couleur indique le «niveau de blanc» d'une source lumineuse qui est quantifié en kelvin. (0 kelvin = -273°C).

■ Le filament de tungstène d'une lampe à incandescence est chauffé à 2700 kelvins (donc 2427°C) et diffuse ainsi sa lumière blanc chaud type.

■ A la surface du soleil, la température est d'environ 6500 kelvins. On appelle cette température de couleur blanc lumière du jour.

■ Pour les LED et les lampes fluorescentes, différentes températures de couleur peuvent être sélectionnées et atteintes grâce à un revêtement composé de différentes substances luminescentes. La température de couleur n'a rien à voir avec la température d'un radiateur thermique. Dans les bâtiments publics, on utilise souvent des lampes blanc neutre de 4000 kelvins.

■ Tandis que les températures de couleur avec les lampes fluorescentes sont standardisées (2700 K, 3000 K, 4000 K et 6500 K), presque toutes les couleurs sont disponibles entre 2500 et 6500 K pour les LED. Une standardisation comme celle des lampes fluorescentes n'existe pas encore.

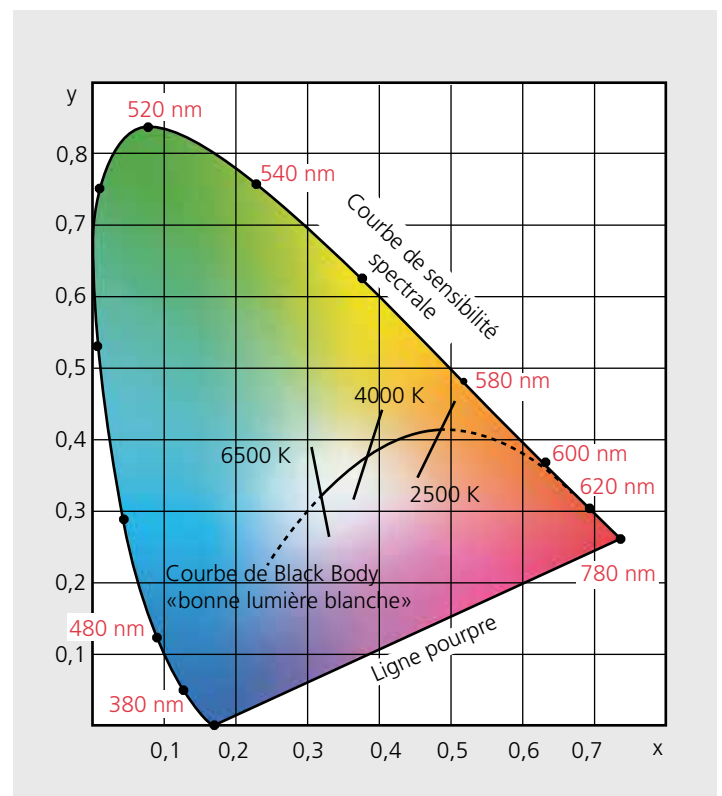
La température de couleur n'est pas une caractéristique de qualité d'une source lumineuse. L'affirmation populaire veut que la lumière froide soit souvent interprétée comme mauvaise lumière, bien que la température de couleur d'une lampe n'ait rien à voir avec ses propriétés de rendu des couleurs. La raison à cela se situe dans la perception subjective: la lumière très froide du soleil est diffusée avec une luminosité considérable. La même température de couleur pour la luminosité d'un local est ressentie comme désagréable surtout par les personnes des pays nordiques. Dans les pays du Sud, les lampes économiques blanc lumière du jour par exemple ne donnent pas lieu à des plaintes. La lumière chaude correspond à la couleur du feu. Elle est ressentie comme agréable et bien-faisante surtout pour les personnes des régions froides du globe.

Cree, le fabricant américain de LED, garantit avec une méthode intéressante que les lampes LED blanc chaud possèdent également une grande efficacité et un indice de rendu des couleurs élevé (supérieur à 90) ainsi qu'une couleur de température stable, définie avec précision. Cree prend une LED blanc lumière du jour et la mélange, dans une chambre de mélange, avec une LED rouge jusqu'à l'obtention de la température de couleur souhaitée. Les différentes modifications de couleur des deux types de LED datées sont enregistrées via un capteur et comparées par le biais d'une électronique intégrée. De cette façon, on garantit à tout moment qu'un nouveau luminaire pourra être fabriqué avec la même quantité exacte de couleur. La possibilité d'obtenir de nombreuses nuances de couleur dans les tons de blanc est ainsi accessible de façon élégante.

Espace chromatique

L'espace chromatique englobe toutes les couleurs du système colorimétrique CIE visibles par l'œil humain. Ce système a été défini par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) pour créer une relation

Illustration 4.12: Triangle des couleurs (forme de semelle) visibles par l'oeil humain.



entre la perception humaine des couleurs (couleurs) et les causes physiques du stimulus de couleurs (composante chromatique). Il s'agit en réalité d'un espace en trois dimensions tel que défini par Rösch en 1928. Sur la surface, on ne peut représenter que deux dimensions (Illustration 4.12). Tous les stimulus de couleur réalisables techniquement, que ce soient les couleurs de lumière ou les couleurs d'objets, se situent à l'intérieur des surfaces chromatiques paraboliques. Le triangle chromatique est appelé «semelle de chaussure» ou «fer à cheval» en raison de sa forme. En fonction de la situation d'éclairage, l'espace chromatique peut se trouver partout dans le fer à cheval. La courbe Black Body est importante sur le plan technique. Sur son tracé, les couleurs sont indiquées en kelvin comme température d'un spot idéal (corps noir). Pour chaque source lumineuse, un espace chromatique peut être indiqué dans un système de coordonnées xy. Pour les bonnes lampes, l'espace chromatique se situe sur la courbe Black Body, par exemple avec $x = 0,45$ et $y = 0,41$ (lampe incandescente).

nom d'indice R_a . Pour évaluer le rendu des couleurs, on utilise huit nuances insaturées sélectionnées, quatre nuances saturées, ainsi qu'un vert-chlorophylle spécial et une nuance semblable à la peau humaine. Le rendu des couleurs sous la source lumineuse à évaluer est comparé, pour chacun de ces modèles chromatiques, à la température de couleur qui se rapproche le plus de celle d'un radiateur thermique (donc presque égale à la couleur de la lumière). La valeur maximale de R_a est égale à 100, lorsque la lampe observée ne dévie pas de la source de référence. Éclairées par cette lampe, toutes les couleurs d'un objet peuvent être identifiées et apparaître «naturelles» à celui qui les observe. Plus l'indice de rendu des couleurs R_a descend en dessous de 100, plus le rendu des couleurs sur les objets éclairés est mauvais.

Comme indice de rendu des couleurs R_a d'une source lumineuse (ou IRC pour Indice de Rendu des Couleurs), on indique en général la moyenne des huit couleurs insaturées. Si cette valeur se situe au-dessus de 80, on parle de bon rendu des couleurs, et de très bon au-delà de 90. Les couleurs saturées, les tons chair et vert chlorophylle, ne sont souvent pas utilisées, mais elles jouent un rôle important surtout pour les lampes LED. La valeur 9 (rouge saturé) indique à quel point la lampe LED est similaire à la lampe halogène. Le rouge saturé devrait donc être spécialement contrôlé pour les LED.

Illustration 4.13:
Tests de l'indice de rendu des couleurs (selon DIN 6169).

Indice de rendu des couleurs (R_a)
La propriété de rendu des couleurs d'une source lumineuse désigne la qualité de visualisation des couleurs d'objet et porte le

R_1	Vieux rose	R_9	Rouge saturé
R_2	Jaune moutarde	R_{10}	Jaune saturé
R_3	Vert jaune	R_{11}	Vert saturé
R_4	Vert clair	R_{12}	Bleu saturé
R_5	Turquoise	R_{13}	Rose (couleur chair)
R_6	Bleu clair	R_{14}	Chlorophylle
R_7	Mauve		
R_8	Lilas		

4.4 Guidage optimisé de l'éclairage

Alors qu'au bureau, les tâches visuelles telles que le travail à l'écran ou la lecture sont au premier plan, dans le commerce de détail, l'accent est mis sur la présentation attrayante des produits et donc sur leur mise en valeur. Dans le domaine de l'hôtellerie, par contre, l'ambiance et l'atmosphère sont requises. La réponse à ces différentes fonctions se trouve dans des diffusions lumineuses et un choix des appareils adéquats.

Avec les sources lumineuses classiques, ce qu'il y avait de mieux étaient des réflecteurs spécialement réalisés. Les LED avec leur possibilité de miniaturisation et leurs caractéristiques de rayonnement plane ne causent pas seulement des problèmes, mais offrent également des possibilités pour de nouvelles méthodes de guidage de la lumière. En comparaison avec les luminaires classiques à réflecteurs, les produits utilisant la technologie des lentilles sont en augmentation. La conception actuelle des réflecteurs et des systèmes de lentilles peut être décrite comme une branche scientifique distincte de l'optoélectronique.

Guidage de la lumière avec des lentilles

Selon l'approche et la technologie, on s'efforce aujourd'hui d'optimiser la qualité optique au moyen de lentilles; dans le même temps, les luminaires peuvent être construits de manière modulaire, ou ceux qui sont à lumière directionnelle peuvent

Technologie LFO

LFO est l'abréviation pour Lens Focal Optic, une technique découverte par Bartenbach, qui émet un faisceau lumineux LED par une ouverture de seulement 8 mm dans le plafond, appelée aussi «lumière sortant d'un orifice». Le noyau de la solution LFO est une lentille qui regroupe les faisceaux. Dans une lentille LFO, il y a deux LED, ce qui permet de changer les couleurs de la lumière.

avoir des dimensions réduites. La lumière ou le trajet du faisceau d'une source lumineuse n'est pas simple à contrôler. Plus les systèmes sont précis, plus l'efficacité et la qualité du rayonnement ou de la distribution de la lumière sont bonnes, mais aussi plus les erreurs dans la plage de diffusion ou les problèmes de couplage du système LED à lentille deviennent visibles, donc gênants.

Grâce aux éléments LFO, le faisceau lumineux peut être groupé afin que tous les faisceaux se coupent en un seul point (ouverture d'un diamètre de 8 mm) et continuent ensuite sous différents angles de répartition lumineuse (Illustration 4.14). Les conditions sont ainsi réunies pour des systèmes d'éclairage hautement anti-éblouissants.

Le système de l'illustration 4.15 est convaincant en ce qui concerne la précision des caractéristiques de rayonnement, mais il baisse fortement sur divers aspects qualitatifs. Ainsi, un pur système de len-



Illustration 4.14: Système LFO à lentille. (Source: Bartenbach)



Illustration 4.15: Par les lentilles collimateur et Spherolit des caractéristiques de faisceau précises peuvent être obtenues. (Source: Erco)

tilles enregistre toujours une luminance quantifiable sur la surface de la lentille de découplage. Un tel système devrait être pourvu d'un énorme réflecteur, pour rester perceptible en tant que luminaire Dark-Light. Étant donné que ce système serait alors énorme, cela n'a pas de sens.

L'efficacité en souffre en raison du double couplage et découplage dans les deux sens. Toute transition importante entraîne des pertes qui se multiplient. Les passages à travers les matériaux, par exemple, entraînent des pertes de transmission de 10 % par changement de matériau, soit une perte totale de près de 20 %. Si le matériel optique n'était traversé qu'une seule fois, ce ne serait que 10 %. A chaque changement et transition de matière, environ 4 % n'est pas transmis mais réfléchi. Ainsi, l'effet négatif est double, puisque les charges importantes en matériaux sont corrélées à une plus grosse absorption. Mélanger avec précision différentes couleurs de lumière dans un système optique, de sorte que le mélange reste homogène quelle que soit la coupe du cône de lumière, est plus compliqué qu'il n'y paraît. Ainsi, très peu de systèmes optiques sont

capables, en l'état, de générer, sans aucun doute, une image parfaite sans un mélangeur de couleurs. On peut le voir encore et encore dans des situations de diffusion lumineuse, où les surfaces décomposent impitoyablement la lumière insuffisamment mélangée dans son spectre initial et détruisent ainsi l'intention réelle d'une image homogène.

Guidage de la lumière avec réflecteurs

Les réflecteurs, en particulier la technologie avancée des réflecteurs de forme libre (micro facettes dans des surfaces de forme libre respectivement, surfaces de forme libre dans d'autres surfaces de forme libre), permettent un guidage extrêmement précis de la lumière. En raison de leur taille, les exigences de conception des réflecteurs sont beaucoup plus élevées que celles des systèmes de lentilles, et leur comportement à l'éblouissement avec les caractéristiques correspondantes est beaucoup plus avancé. Les réflecteurs à surfaces de formes libres secondaires permettent un contrôle de tout éblouissement gênant, par un guidage précis de la lumière, comme par exemple une coupe longitudinale (voir Illustration 4.16).

Un autre développement important dans la technologie des réflecteurs à forme libre est le mélange des couleurs à l'intérieur du réflecteur. Comme nous l'avons mentionné, cette possibilité existe également dans les systèmes de lentilles, mais avec des pertes plus importantes. Le dernier développement de l'entreprise Bartenbach rapproche la technologie des réflecteurs avec un mélange de couleurs absolument homogène ainsi qu'un niveau de rendement élevé.

C'est pourquoi, un demi-cercle est représenté sur un quart de segment de la forme libre de l'optique à facettes, ce qui représente non pas 360°, mais 720°. Il en résulte un mélange de couleurs absolument homogène. Les facettes sont d'ailleurs aussi d'optique à forme libre. Les segments à formes libres sont encastrés dans des réflecteurs à formes libres, ce qui rend le système très complexe, mais le rend

Illustration 4.16:
Squadro avec technologie de réflecteur de forme libre à alimentation secondaire. (Source: XAL GmbH)



Illustration 4.17:
RMJ Microfacettes en surfaces libres. (Source: Projekt-leuchten GmbH)



aussi très fiable. De plus, un tel réflecteur ne peut pratiquement plus être copié, car chaque petite modification entraîne un dysfonctionnement du système.

Guidage de la lumière hybride

La combinaison entre lentilles et système à réflecteur est considérée comme système hybride. Ses performances sont caractérisées par l'alliance des qualités positives des différents systèmes. Les luminaires qui en résultent sont peu diffusants, très efficaces, précis dans le guidage de la lumière et extrêmement réduits en termes d'éblouissement et de limitation des reflets. Ces luminaires fonctionnent selon la technique Dark-Light, la lumière pouvant se déployer ses effets sur l'objet ou le matériau sans indiquer visiblement d'où vient le faisceau lumineux.

Les systèmes diffus n'ont pas besoin de réflecteurs car ils sont utilisés avec une faible luminance sur de grandes surfaces. Le fait que même la moindre lumière diffuse provoque des niveaux de luminance élevés est un secret de polichinelle. C'est pourquoi la précision des systèmes optiques doit être extrême. Cela se voit aussi dans le choix des couleurs des cylindres anti-éblouissants, qui ne sont pas simplement noirs, mais qui ont des nanostructures mates et ternes, comme le Maybach-Schwarz – le nec plus ultra des absorbeurs de lumière.

*Illustration 4.18:
Technologie de lentille LFO combinée
à un réflecteur
anti-éblouissement.
(Source: Molto Luce
Trigga)*



4.5 Innovations LED

En plus des développements sur le marché des LED, des LED basse et moyenne puissance aux LED haute et ultra haute puissance, dans des variantes avec différents flux lumineux, caractéristiques de rayonnement, qualités de rendu des couleurs et couleurs de lumière, d'autres caractéristiques sont disponibles telles que les formes de boîtiers, les dispositifs montés en surface (SMD), les chip on board (COB), chip array SMD (CAS). Tout cela ne peut pas être différent en raison du manque de normalisation des systèmes par les principaux fabricants (Cree, Nichia, Citizen, Samsung, Lumiled). En termes simples, cela signifie qu'une trentaine de paramètres doivent être analysés et pris en compte avec précision afin d'obtenir la distribution et la qualité de lumière souhaitées. Le développement des nouvelles Chip-Scale-Package-LED (CSP) miniaturisées exige un mode de pensée innovant et nouveau, mais aussi de nouvelles machines d'assemblage, systèmes de lentilles, outils, etc.

Rendu des couleurs parfait

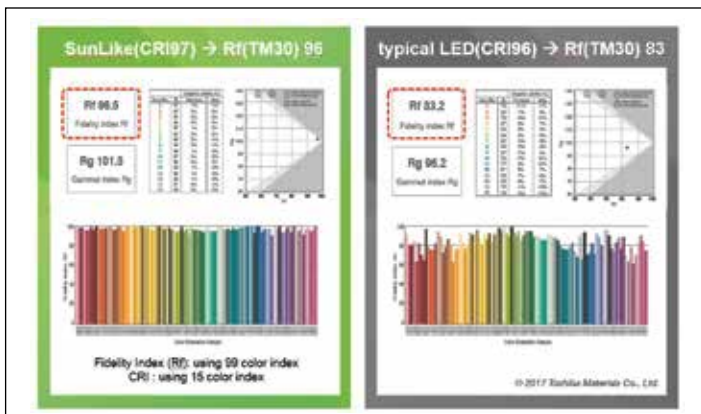
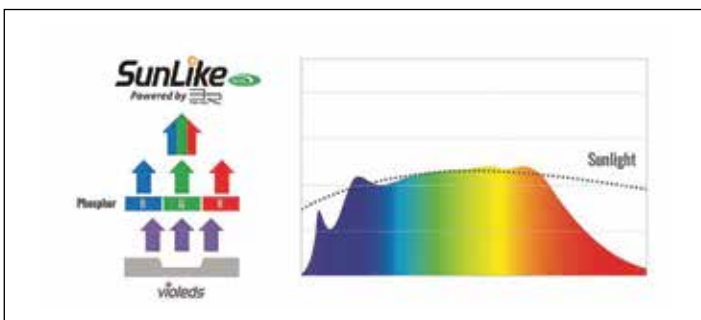
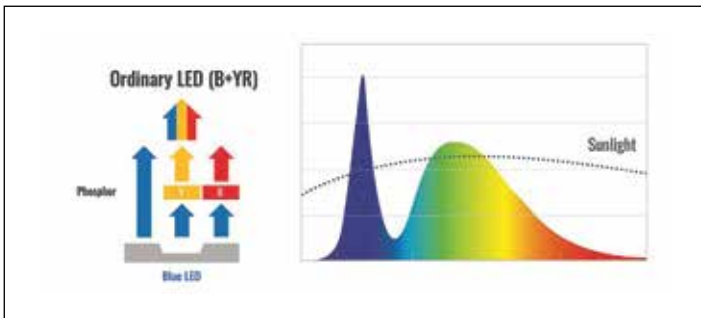
Une priorité extrêmement importante pour la qualité de la lumière réside dans la couleur de la lumière-même et, surtout, dans le rendu des couleurs. Les systèmes LED ne sont pas uniquement efficaces en matière d'énergie, mais aussi très précis dans le rendu des couleurs. Ainsi, Seoul Semi Conductor a introduit la gamme Sun-Like, qui obtient de bons résultats face aux valeurs réelles de rendu des couleurs selon R_a (IRC) et dans le nouveau procédé TMI-30, et égale presque la lumière naturelle en termes de distribution spectrale.

Les variations par rapport au cycle naturel de la lumière du soleil sont claires et sont toujours discutées, bien que la distribution spectrale des lampes à décharge soit déjà très bonne. Avec cette distribution spectrale de la lumière, la rétine est déjà beaucoup mieux servie qu'avec une lampe fluorescente et on oublie souvent le fait que l'ensemble du processus visuel a un bilan énergétique. Les facteurs primaires, qui sont toujours pris en considération, ne

Illustration 4.19: Distribution spectrale classique d'une décharge bleue. (Source: SSC Sunlike)

Illustration 4.20: Nouvelle SunLike LED avec décharge pourpre. (Source: SSC Sunlike)

Illustration 4.21: Comparé à la LED classique, le SunLike affiche des valeurs sensationnelles et un IRC de 97. (Source: SSC Sunlike)



concernent que l'apport énergétique pour la production de lumière. Le processus secondaire est encore plus important, il s'agit encore de l'effet lumineux. Le rendement lumineux, l'éblouissement et le contraste influencent la vision, comme de bien entendu. La dépense énergétique des fonctions cérébrales pour la perception et le traitement ne peut être négligée. L'effet non visuel, qui est également lié à l'énergie ou la fatigue, doit également être pris en compte.

Le nouveau SunLike impressionne non seulement par son équilibre spectral, mais aussi par ses légères mais lisibles différences de contraste et de profondeur de couleur, particulièrement visibles sur les images. Le processus visuel est en outre soutenu de manière optimale. La gamme

rouge est très bonne par rapport aux LED classiques, mais pourrait être encore plus ajustée à la lumière du jour. Il est à noter que la profondeur de champ, la tridimensionnalité et le contraste font une différence essentielle.

En plus de Seoul Semi Conductors avec SunLike, Nichia avec Optisolis a également fait preuve d'une performance couleur insoupçonnée. Nichia parle déjà de produits standards qui règlent la palette de couleurs sur IRC au-dessus de 95. En outre, le système permet également une conception spectrale pour des besoins particuliers.

Nouvelles technologies de convertisseurs

Les possibilités offertes par les LED, avec différentes couleurs de lumière dans un espace réduit, suscitent non seulement l'envie pour les clients, mais offrent également une lumière contrôlée sur le plan de la chronobiologie ; cela conduit non seulement vers une meilleure efficacité de travail et de concentration, mais aussi vers une amélioration significative de la santé et de la vision, lors d'un séjour quasi permanent à l'intérieur. Les contrastes plus élevés et un spectre lumineux holistique améliorent l'image captée par la rétine. Il est donc plus facile pour une personne qui travaille d'effectuer ce processus visuel avec moins d'énergie et d'utiliser la bonne quantité de lumière dans la bonne plage spectrale et au bon moment.

Les nouveaux convertisseurs sont multicanaux. Par exemple, un conducteur avec 2 canaux peut piloter différentes nuances de blanc (par ex. 2200 K – 5000 K) et couvrir presque toutes les variations d'ambiance d'un éclairage de bureau.

Régulation: Les anciens convertisseurs ont montré qu'aucune régulation de 0 % n'était possible. Pour beaucoup d'appareils disponibles sur le marché, seulement 10 % pouvait être atteint. Ils étaient normalement vendus en tant qu'appareils à gradation sans aucune indication de restriction. Dans de nombreux cas, cette limitation technique n'a été mentionnée que sur demande, en raison de l'état technolo-

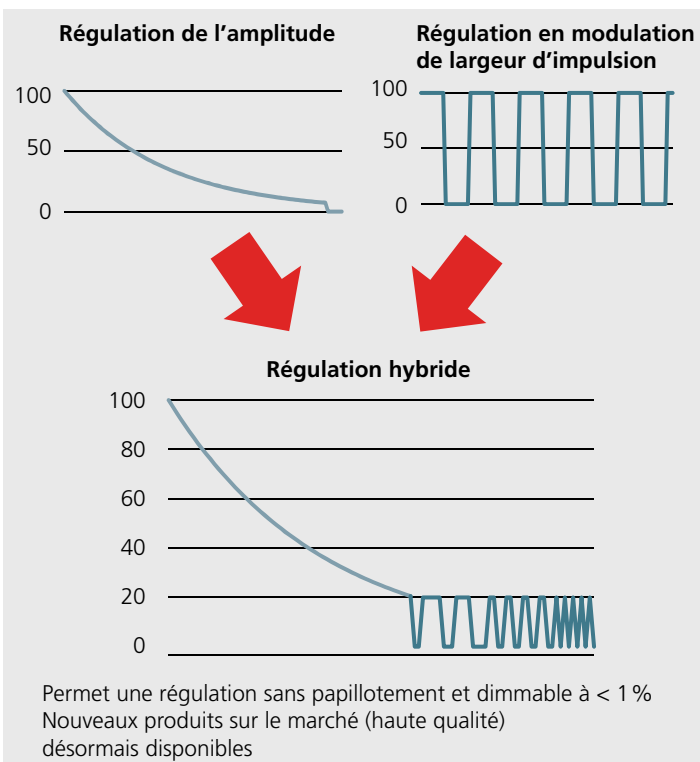
gique. Ces appareils PVM (Puls Width Modulation – modulation de largeur d'impulsion) peuvent générer d'autres problèmes, comme un clignotement dans les plages de gradation défavorables, incompatibilités liées à des spécificités techniques incorrectes, ou des dysfonctionnements lorsqu'ils sont contrôlés par des protocoles de BUS externes, comme DALI («rester bloqué»). Les meilleurs pilotes pouvaient alors réduire l'intensité lumineuse jusqu'à 1 %, ce qui se traduisait souvent par un arrêt soudain du convertisseur. En outre, le problème de la LED, à savoir l'état indéfini dans la plage de variation en profondeur, est également apparu.

Comme le montre l'illustration 4.22, la régulation hybride comme combinaison d'une variation d'amplitude et d'une modulation de largeur d'impulsion fonctionne aussi dans les plages de gradation minimales. Ces appareils sont disponibles en version monocanal et multicanaux.

Autres développements

■ Unico de XAL est un Cluster-Downlight qui peut modifier l'aspect des pièces de manière étonnante. Le downlight encastré de 12 sur 12 cm de large est divisé en

Illustration 4.22:
Régulation hybride.
(Source:
Bartenbach)



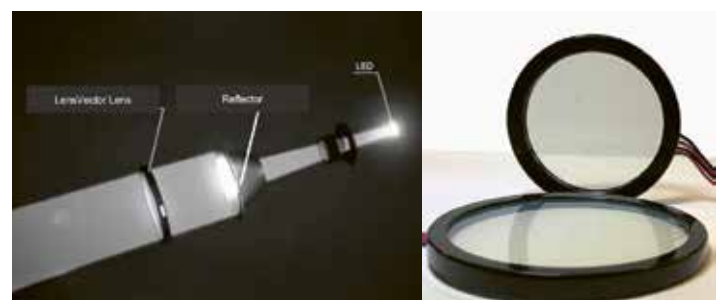
9 segments, qui peuvent être équipés de différentes manières. Chacun de ces 9 champs peut générer sa propre photométrie (courbe de distribution lumineuse, LVK) avec différentes couleurs de lumière. Ceci permet à la même pièce d'être esthétiquement transformée par un éclairage ponctuel, un éclairage uniforme du sol ou même une lumière frisante sur les murs. Cette manipulation est toujours possible dans le Downlight.

■ La lentille à cristaux liquides semi-conducteurs développée par Lens Vector peut modifier l'angle de rayonnement de 5° à 60°. L'objectif interchangeable et contrôlable a un énorme potentiel.

Illustration 4.23
(haut): Unico de XAL. (Source:
XAL GmbH)

Illustration 4.24 (mi-
lieu): Unico en fonction. (Source:
XAL GmbH)

Illustration 4.25:
Dynamic beam de
Lens Vector.



4.6 Test de lampes LED à filaments

Après l'arrivée sur le marché, en remplacement des lampes à incandescence et halogènes, des premières LED à prix élevé, avec de grands refroidisseurs et d'apparence moins esthétique, les lampes Retrofit LED d'aujourd'hui peuvent à peine être distinguées des anciennes. Sous le nom de lampe à filament LED, elles sont devenues un substitut pratique pour les lampes à incandescence. L'illustration 4.26 montre le changement d'apparence de la lampe de remplacement LED.

Un test réalisé en 2016 pour le compte de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), du Centre suisse de l'énergie (Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (ekz)) et de l'émission de télévision Kassensturz a examiné la qualité des nouvelles lampes LED.

Le Test

Elles sont disponibles dans le commerce sous le nom de lampes à filament, un dérivé du terme «filaments» anglais pour fils. Les cinq à dix filaments équipés de diodes électroluminescentes sont installés de manière concentrique dans un globe de verre, semblable à une ampoule. Les quelques 30 LED rouges et bleues par filaments sont connectées par série et deux filaments en parallèle; selon la conception, la tension du brin sur un fil est comprise entre 50 V et 80 V, la puissance électrique d'environ

1 W (Illustration 4.27). Il en résulte une puissance de lampe électrique de 5 à 10 W. La couleur de la lumière est essentiellement déterminée par les proportions de LED bleue et rouge. L'illustration 4.28 montre un exemple de spectre lumineux avec le «pic rouge» typique. Afin de compléter le spectre lumineux, les fils de presque 40 mm de long sont revêtus par une couche fluorescente, ce qui produit la couleur habituellement jaunâtre des fils. L'efficacité énergétique des lampes à filaments est 10 fois supérieure à celle des lampes à incandescence et deux fois plus élevée que celle des lampes à économie d'énergie. Les lampes sont donc très efficaces, mais comment se comparent les produits en termes de rendu des couleurs, de durée de vie et de pouvoir de commutation? L'étude fournit des informations sur «les lampes à filament LED en test».

Illustration 4.26: La métamorphose de la lampe LED de remplacement.

Année de vente	2010	2019
Lampe LED		
Prix	70 CHF	10 CHF
Puissance électrique	12 Watt	6 Watt
Flux lumineux	806 Lumen	806 Lumen
Efficiéce	65 lm/W, classe A	134 lm/W, classe A++
Poids	220 grammes	30 grammes

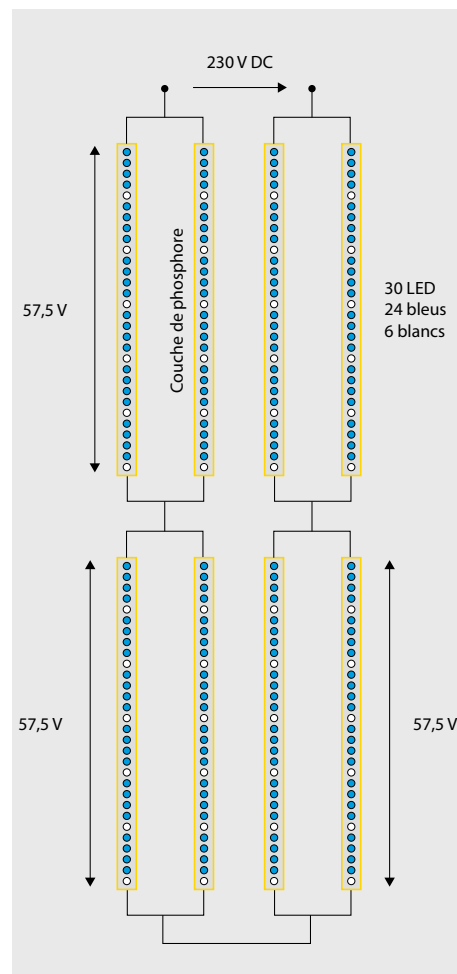


Illustration 4.27: Schéma de câblage simplifié d'une lampe à filaments: huit filaments au total sont connectés deux à deux en série. La tension de fonctionnement est de 57,5 V courant continu, ce qui provoque un redresseur dans le culot. Dans cette configuration, 240 LED sont allumées pendant le fonctionnement. (Source: Gasser, eLight)

Grandes différences dans le test

Des écarts parfois importants des valeurs déclarées pour la mesure sont visibles. Ceci s'applique en particulier au critère de la durée d'utilisation ou à la diminution du flux lumineux pendant le fonctionnement. Parmi les 9 produits analysés, «Sylvania» obtient les meilleurs résultats: efficacité énergétique maximale, durée de vie très longue et déclaration réaliste. Les lampes de Megaman et Philips sont bien déclarées. Les bons résultats de la lampe «Philips 7,5 watts» sont quelque peu relativisés par une durée de vie plus courte et ceux de la lampe Megaman seulement par son efficacité médiocre. Au milieu se trouvent les produits Philips 9.5 W et Xnovum. La lampe LCC de Xnovum a généralement été déclarée erronée ou incomplète, en particulier pour des propriétés importantes telles que le rendu des couleurs. Pour sa technologie, elle ne diffère que légèrement des autres modèles à filaments. A cet égard, le terme LCC (Laser Crystal Ceramics) est au moins inexact, voire trompeur. Les trois produits Segula (7 W et 8 W), Wiva et Onlux n'étaient pas satisfaisants, surtout en ce qui concerne leur durée d'utilisation; elles ont été retirées du marché.

Conclusion: Le test montre que les exigences techniques de production pour les lampes à filaments de qualité sont disponibles. Cependant, pour la plupart des lampes, le flux lumineux est réduit plus fortement et plus rapidement que ne l'indique la déclaration. Étant donné que ces

lampes sont souvent vendues avec l'argument d'une longue durée de vie, cet écart est particulièrement dérangeant.

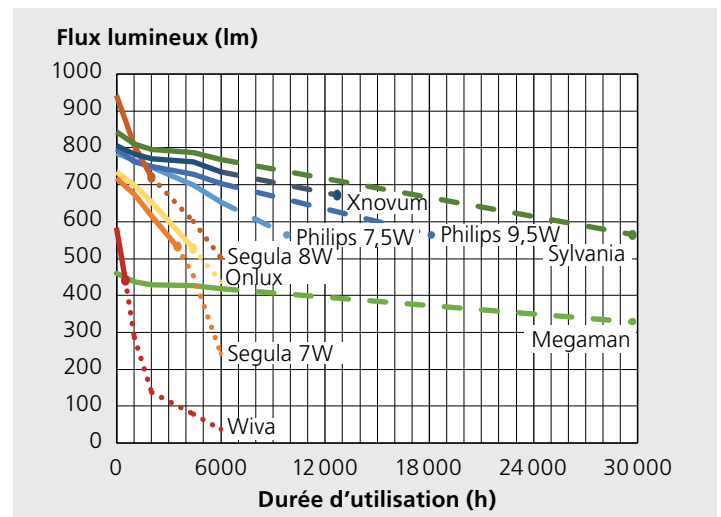
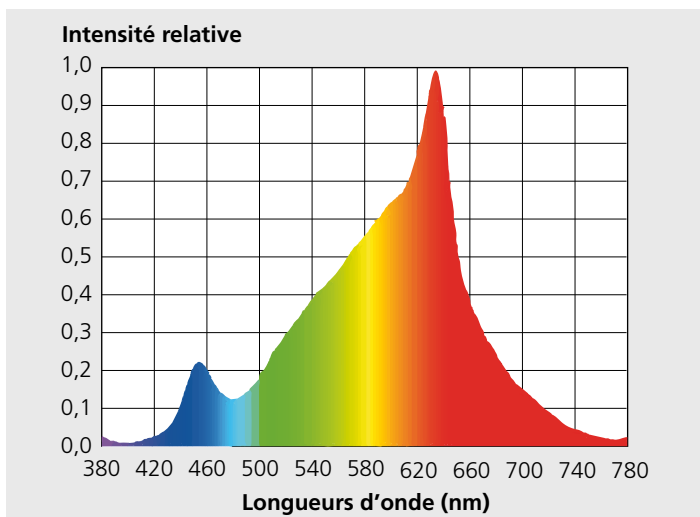
Critères d'évaluation

Les mesures ont été effectuées à l'Institut d'essais et de certification du VDE. L'institut d'Offenbach dispose du matériel de mesure nécessaire. Les **intensités lumineuses** dans toutes les directions (courbe de répartition lumineuse) ont été recueillies au moyen d'un photogoniomètre. La **puissance électrique** fournie un wattmètre, résultant en l'**efficacité énergétique** (lm/ W). Le **flux lumineux** – et donc la durée d'utilisation – a été mesuré avec la sphère d'Ulbricht après 0, 1000, 2000, 4400 et 6000 heures de fonctionnement. La **durée d'utilisation** est définie comme le nombre d'heures de fonctionnement pendant lesquelles le flux lumineux de la lampe atteint au moins 70 % de la valeur déclarée. L'illustration 4.29 montre de grandes différences entre les produits. Les deux lampes Sylvania et Megaman ont atteint une durée de vie de 30000 h, la Wilva n'ayant plus apporté au bout de 500 h les 70 % requis de flux lumineux déclaré (pour un foyer équivalent à 10000 heures de fonctionnement sur environ dix ans).

Le rendu des couleurs: Pour tous les produits, à une exception près, l'indice de rendu des couleurs est déclaré 80, les mesures se situent toutes entre 80 et 82. Sur l'emballage de la lampe Xnovum, il est

Illustration 4.29: Flux lumineux des 9 lampes à filament en fonction de la durée d'utilisation. Les valeurs sur une durée d'utilisation de 6000 heures sont extrapolées. Les points en gras indiquent la fin de la durée d'utilisation en fonction des conditions du test: au moins 70% du flux lumineux déclaré pendant la durée d'utilisation. Une fausse déclaration conduit logiquement à une valorisation inférieure. Seuls deux produits ont atteint les valeurs déclarées, les sept autres sont restés en dessous des attentes.

Illustration 4.28: Spectre des couleurs d'une lampe à filament: longueur d'onde en nm et intensité relative correspondante. (Source: Gasser, eLight)



noté 94 ce qui, compte tenu de la valeur réelle, doit être considéré comme une fausse déclaration.

Température de couleur: Pour la lampe Wiva, une température de couleur de 3000 K est déclarée, tous les autres produits sont désignés par 2700 K. Les valeurs mesurées sont comprises entre 98 % et 104 % de la déclaration. Les mesures de rendu des couleurs et de la température de couleur ont été effectuées avec un spectromètre de couleur.

Le pouvoir de commutation est essentiel pour tout produit. Toutes les lampes peuvent être allumées et éteintes beaucoup plus fréquemment – plus de 200 000 fois – par rapport à la déclaration. La déclaration est incorrecte ou incomplète pour certains produits. Cela est particulièrement vrai pour les lampes de Segula et pour le «Xnovum».

Conclusion: la lampe Sylvania a remporté le test en raison notamment de son efficacité énergétique élevée de 140 lm/W et de sa durée d'utilisation importante. La lampe Megaman est la seule lampe à intensité dimmable testée; son efficacité énergétique moindre est donc due à des raisons techniques. La Philips 9,5 watts est fabriquée avec la technologie LED conventionnelle et a servi de produit de référence lors du test.

Illustration 4.30:
Résultats du test de
9 lampes à fila-
ments.

Lampes à filaments: 9 produits testés									
Produit	Megaman	Philips	Philips	Segula	Segula	Sylvania	Wiva	Xnovum	Onlux
Désignation	Lampe à filament régulée	Deco Classic	LED-Standard	LED Filament Bulb	LED Filament Bulb	LED Home-light	Wire LED	LCC	FiLux
Prix d'achat	27.40 CHF	12.90 CHF	8.50 CHF	14.80 CHF	19.80 CHF	16.75 CHF	14.95 CHF	35.50 CHF	9.90 CHF
Puissance électrique, Déclaré	5,5 W	7,5 W	9,5 W	7 W	8 W	6 W	6 W	7 W	6,5 W
Mesure	5,1 W	7,3 W	8,8 W	7,6 W	8,4 W	6,0 W	5,3 W	6,0 W	6,4 W
Flux lumineux, Déclaré	470 lm	806 lm	806 lm	760 lm	1050 lm	806 lm	630 lm	960 lm	690 lm
Mesure	460 lm	786 lm	797 lm	718 lm	943 lm	844 lm	584 lm	807 lm	734 lm
Ecart flux lumineux	- 2 %	- 2 %	- 1 %	- 6 %	- 10 %	+ 5 %	- 7 %	- 16 %	+ 6 %
Efficacité énergétique	85/90 lm/W	107/108 lm/W	85/91 lm/W	109/94 lm/W	131/112 lm/W	134/141 lm/W	105/110 lm/W	137/135 lm/W	106/115 lm/W
Index de rendu des couleurs R_a, Déclaré	80	80	80	80	80	80	80	94	80
Mesure	81	82	81	81	80	81	81	80	80
Ecart	+ 1 %	+ 3 %	+ 1 %	+ 1 %	+ 0 %	+ 1 %	+ 1 %	-15 %	+ 0 %
Temp. de couleur, Déclaré	2700 K	2700 K	2700 K	2700 K	2700 K	2700 K	3000 K	2700 K	2700 K
Mesure	2720 K	2795 K	2806 K	2726 K	2776 K	2679 K	2937 K	2647 K	2722 K
Ecart	+ 1 %	+ 4 %	+ 4 %	+ 1 %	+ 3 %	- 1 %	- 2 %	- 2 %	+ 1 %
Durée d'utilisation, Déclaré	15 000 h	15 000 h	25 000 h	15 000 h	15 000 h	15 000 h	15 000 h	35 000 h	25 000 h
Mesure	29 700 h	9 800 h	18 100 h	3 500 h	1 800 h	29 700 h	500 h	12 700 h	4 500 h
Ecart	+ 98 %	- 35 %	- 28 %	- 77 %*	- 88 %*	+ 98 %	- 97 %*	- 64 %*	- 82 %*
Appréciation globale	5,2	4,8	4,4	3,5	3,5	6,0	3,6	4,2	3,6

Remarques: Les valeurs présentant des écarts importants par rapport aux autres résultats de mesure sont marquées en rouge ou en vert. * Les grandes différences entre la déclaration et la mesure sont issues des fausses déclarations fournies avec les produits.

4.7 Idées fausses sur les LED

Il y a toujours des demi-vérités ou des contrevérités à entendre au sujet des LED. En voici quelques exemples:

■ **Affirmation 1:** La technologie LED est une invention du 21^e siècle.

Ce qui est vrai: Les premières LED ont été commercialisées dans les années 1960. Elles étaient rouges, peu efficaces et utilisées par exemple dans les horloges numériques. Il faudra attendre les années 2000 pour qu'on réussisse à fabriquer des LED blanches.

■ **Affirmation 2:** Les LED produisent 90 % de lumière, aucune chaleur n'est émise.

Ce qui est vrai: Les diodes lumineuses blanches peuvent transformer 30 % à 50 % de l'électricité en lumière, le reste c'est de la chaleur. Elle est toutefois générée à l'arrière de la surface éclairante de la LED, par conséquent le faisceau lumineux en lui-même est dépourvu de chaleur.

■ **Affirmation 3:** Les LED sont plus efficaces que les tubes fluorescents.

Ce qui est vrai: L'efficacité actuelle des diodes lumineuses se situe entre 100 et 160 lumens par watt. Les meilleurs tubes fluorescents présentent une efficacité lumineuse de près de 100 lumens par watt. Les LED peuvent générer des niveaux d'éclairage ponctuellement très élevés en raison de leur lumière fortement dirigée. Il ne faut toutefois pas confondre niveau d'éclairage et quantité de lumière: le jet d'eau d'un tuyau d'arrosage peut arroser très loin avec une petite buse, même avec une faible quantité d'eau.

■ **Affirmation 4:** Les LED produisent une lumière froide, de mauvaise qualité.

Ce qui est vrai: Le spectre de qualité de la technologie LED est important. Les meilleures LED ont une qualité de lumière comparable à celle des lampes halogènes. Ces LED sont très répandues, mais l'observateur ne peut souvent pas les identifier du tout. Les LED à lumière froide et de qualité inférieure sont notamment utilisées dans les lampes de poche et les éclairages de vélo.

■ **Affirmation 5:** La durée de vie des LED est quasiment illimitée.

Ce qui est vrai: Seules les LED de haute qualité possèdent une longue durée de vie

(30 000 à 100 000 heures). Un bon bloc d'alimentation (convertisseur de courant de tension de réseau de 230 V en une tension continue inférieure) et une conception qui assure la dissipation de la chaleur des puces des LED y contribuent. Le corps de la lampe doit être métallique et ne doit pas être chaud en fonctionnement (seulement tiède).

■ **Affirmation 6:** Les LED blanches sont le résultat d'un mélange des couleurs rouge, vert et bleu (RVB).

Ce qui est vrai: La couleur blanche des LED s'obtient en mélangeant les couleurs primaires. Cependant, la qualité de la lumière diminue, car il manque des éléments importants dans le spectre des couleurs. Les bonnes LED de couleur blanche sont la combinaison d'une LED de couleur bleue avec un revêtement fluorescent spécial comme pour les tubes fluorescents.

■ **Affirmation 7:** L'éclairage LED n'est pas économique.

Ce qui est vrai: Cela dépend énormément de l'utilisation que l'on fait des LED. Une installation de LED dans un restaurant, un magasin ou un hôtel avec environ 4000 heures de fonctionnement par an s'amortit actuellement entre 2 et 4 ans environ. Pour les autres applications, les délais de retour sur investissement vont de 4 (halls industriels) à 10 ans (éclairage des bureaux, des écoles, des maisons, etc.).

■ **Affirmation 8:** L'intensité des lampes LED ne peut pas être réglée.

Ce qui est vrai: Contrairement aux lampes à incandescence, ne peuvent être graduées que les lampes LED conçues pour cela. La majorité des gradateurs pour lampes halogènes étant conçus principalement pour les lampes à partir de 20 W, les lampes LED auto-graduables (avec des puissances classiques de 4 à 20 W) ne peuvent être graduées que si plusieurs lampes fonctionnent en même temps.

■ **Affirmation 9:** Comme les lampes économiques, les LED génèrent de la pollution électromagnétique.

Ce qui est vrai: Les LED ont besoin d'un ballast tout comme les lampes économiques. Cependant, contrairement aux lampes économiques, les diodes électroly-



Illustration 4.31: Les lampes LED avec la désignation «Warm Glow» brillent aussi agréablement qu'une lampe halogène, même lorsque la lumière est tamisée.

minescentes utilisent un courant continu (presque) sans rayonnement. Des mesures de l'EPF Zurich démontrent que les lampes LED émettent un rayonnement aussi faible que celui des lampes à incandescence.

■ **Affirmation 10:** La fabrication des LED utilise beaucoup d'énergie.

Ce qui est vrai: L'énergie nécessaire à la fabrication des LED représente moins de 5 % de l'énergie de fonctionnement pendant la durée de vie. Les déchets de fabrication sont très faibles: plus de 90 % des puces de LED produites peuvent être utilisées. Ce taux d'utilisation élevé s'explique également par la grande différence de qualité des produits vendus.

■ **Affirmation 11:** La couleur blanche des LED est différente d'une lampe à l'autre.

Ce qui est vrai: la tonalité du blanc des LED Retrofit blanc chaud, dans les lampes d'appoint domestiques, peut varier d'un fabricant à l'autre, ce qui donne un blanc plus rougeâtre, jaunâtre ou verdâtre. Il est donc conseillé de vérifier la couleur d'une lampe en éclairant la paume de la main avant de l'acheter au magasin.

■ **Affirmation 12:** Les LED défectueuses peuvent être jetées à la poubelle.

Ce qui est vrai: Les lampes LED contiennent des composants électroniques. A la fin de leur longue durée de vie, elles doivent être éliminées en bonne et due forme comme tous les autres déchets électriques et électroniques (ordinateurs, radios, fers à repasser). Contrairement aux lampes économiques, les LED ne contiennent pas de mercure nocif.

*Illustration 4.32:
Lampe à tige R7s en
version halogène et
LED.*



■ **Affirmation 13:** L'efficacité énergétique des LED va continuer à s'améliorer.

Ce qui est vrai: Depuis 2010, l'efficacité énergétique des diodes lumineuses a quelque peu doublé. Au cours des 10 prochaines années, on s'attend à une nouvelle augmentation d'environ 50 %, mais moins forte qu'auparavant. Les limites physiques pour la lumière blanche de haute qualité seront alors atteintes. Le potentiel d'amélioration est plus important pour la lumière LED colorée.

■ **Affirmation 14:** Pour chaque lampe halogène, il y a un produit de remplacement LED.

■ **Ce qui est vrai:** Pour un grand nombre de lampes conventionnelles, il existe des produits de remplacement LED qui ne diffèrent que légèrement des lampes halogènes (d'origine). Avec certains types de lampes (lampes halogènes R7 ou lampes à broches), cependant, les produits de remplacement sont beaucoup plus volumineux, de sorte que dans certains cas, un remplacement n'est pas possible ou ne fait pas sens. Voir également l'illustration 4.32.

■ **Affirmation 15:** La lumière bleue des LED nuit à la santé.

■ **Ce qui est vrai:** Lors d'une utilisation quotidienne normale, la partie bleue de la lumière des lampes LED disponibles dans le commerce est inoffensive. Cependant, la lumière bleue est généralement plus énergétique que la lumière rouge et une exposition longue et directe – surtout dans les yeux – est dangereuse si elle dure longtemps. La lumière du jour contient beaucoup de lumière bleue – c'est pourquoi le ciel est bleu quand il fait beau.

■ **Affirmation 16:** L'avenir est aux LED organiques (OLED).

Ce qui est vrai: Les LED organiques permettent d'obtenir des surfaces éclairantes. La technologie OLED n'en est toutefois encore qu'à ses débuts: actuellement seules des LED organiques de quelques centimètres carré de surface sont fabriquées. Il faudra encore attendre des années avant que l'industrie puisse proposer des LED organiques qui tapisseront des murs et des plafonds entiers.

Luminaires

5.1 Luminaires professionnels et domestiques

Les termes «lampe» et «luminaire» sont souvent confondus. En réalité, la lampe correspond à la source lumineuse et le luminaire est l'abat-jour qui se trouve sur ou autour de la source lumineuse. Le marché des luminaires comprend le marché des professionnels, le marché pour les privés et un petit marché pour les luminaires design.

■ **Les luminaires professionnels** sont surtout destinés aux bâtiments et aux installations dans les services et l'industrie. Les luminaires sont pour la plus grande part produits en Europe. En Suisse également, il existe de nombreuses sociétés qui conçoivent et fabriquent ce type de luminaire, par exemple Baltensweiler, Belux, Fluora, Huco, Kaspar Moos, Licht + Raum, Mabalux, Neuco, Küttel, Prolux, Regent, Ribag et Tulux. Les luminaires professionnels sont conçus selon les principes bien connus de la technologie lumineuse et sont fabriqués et évalués dans un laboratoire spécialisé dans la lumière. Ils ne sont distribués que par le biais du commerce spécialisé ou de concepteurs ou d'installateurs. Les luminaires professionnels sont la plupart du temps vendus en grandes quantités et sont moins chers que ce qu'on imagine (prix moyen final de CHF 120), en raison d'une production située en Europe. En Suisse, environ 3,5 millions de luminaires professionnels sont vendus et installés par an. Plus de 80 % des nouveaux luminaires installés aujourd'hui sont des produits LED.

■ **Les luminaires domestiques** sont, contrairement aux luminaires professionnels, produits pour la plupart en Extrême-Orient et principalement importés et distribués par des grossistes. En général, les luminaires ne sont pas conçus selon des critères de technologie lumineuse, mais comme des objets d'agrément. La plupart des luminaires domestiques ne sont pas évalués. Leur efficacité énergétique est plutôt aléatoire, en dehors de la source lumi-



Illustration 5.1: Luminaires économiques d'intérieur de Tobias Grau (www.tobiasgrau.com).





Illustration 5.2
Luminaires économiques d'intérieur
de Baltensweiler
(www.baltensweiler.ch).



Illustration 5.3
(colonne de gauche): Luminaires économiques d'intérieur de Belux (www.belux.ch).

Illustration 5.4
(colonne de droite): Luminaires économiques d'intérieur de Ribag (www.ribag.ch).

neuse, souvent une lampe halogène ou une LED à vis ou enfichable. Le boom des LED a commencé plus tard dans le secteur domestique que dans le marché professionnel; en 2017, environ la moitié des nouveaux luminaires vendus étaient équipés de la technologie LED. Le prix moyen des luminaires domestiques tourne autour de CHF 40. Comme l'efficacité énergétique des luminaires est également importante dans l'habitat privé, la Haute Ecole spécialisée de Coire a créé un laboratoire simple de mesure, dans lequel sont évalués les luminaires domestiques. Les grossistes Migros et Coop utilisent ce service: www.htwchur.ch/forschung-und-dienstleistung/labore/beleuchtungslabor

■ **Les luminaires design** constituent un petit marché de niche. Ils sont conçus de manière professionnelle et conviennent tant aux habitations qu'aux locaux représentatifs des hôtels, des banques et des administrations. Les luminaires design dont le prix est supérieur à CHF 500 sont plus coûteux que les luminaires fabriqués en série. Ils sont disponibles dans le commerce de meubles et le commerce spécialisé dans l'électricité, l'électronique et l'électroménager. Parmi les plus importants fabricants de luminaires design, on trouve entre autres Artemide, Baltensweiler, Belux, Tobias Grau, Hellinge ou Ribag.



*Illustration 5.5:
Luminaires économiques d'intérieur de Philips, disponible dans les magasins spécialisés en luminaires.*



*Illustration 5.6:
Luminaires économiques d'intérieur d'Artemide (www.artemide.ch).*

5.2 Typologie

Les luminaires professionnels sont jugés selon des critères de technologie lumineuse et peuvent donc être évalués. La première mission d'un luminaire est de guider la lumière. Par ailleurs, le luminaire protège de manière ciblée certaines parties de la pièce contre l'éclairage. Souvent un dispositif anti-éblouissement y est associé. Cette mise au point des faisceaux lumineux peut être effectuée avec différents moyens, de manière efficace ou non. Les dispositifs les plus courants pour guider la lumière sont les vitres mates, les prismes plastiques ainsi que les réflecteurs métalliques réfléchissants ou mats. Les luminaires sont décrits avec la courbe de répartition lumineuse (LVK) où sont représen-

tées les directions longitudinale et transversale. Selon la base de données en ligne de la société Relux (www.relux.com), environ 250000 luminaires différents sont disponibles sur le marché européen. Les modèles les plus utilisés pour l'espace intérieur sont classés en huit catégories: Plafonniers, plafonniers encastrés, downlights, projecteurs, lampadaires, luminaires suspendus, luminaires industriels et appareils d'éclairage domestique. Les illustrations 5.7 à 5.14 présentent des exemples efficaces issus de la liste des luminaires des huit catégories certifiées par Minergie (www.toplicht.ch), la courbe de répartition lumineuse ainsi que d'autres caractéristiques.

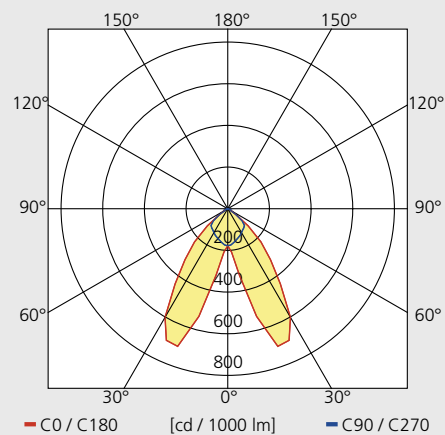


Illustration 5.7:
Plafonnier apparent

- Nom: Traq
- Fabricant: Regent Lighting
- Lampe: LED
- Puissance: 49 W
- Flux lumineux: 7000 lm
- Efficacité: 143 lm/W
- Lumière directe: 100 %
- Rendu des couleurs $R_a > 80$
- Température de couleur 4000 K
- Minergie: Re-0202

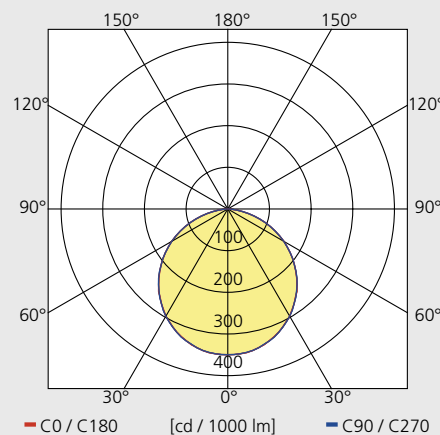
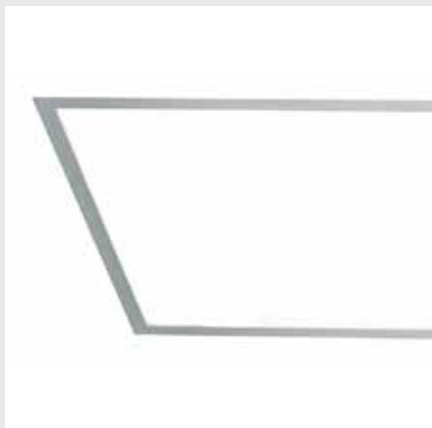
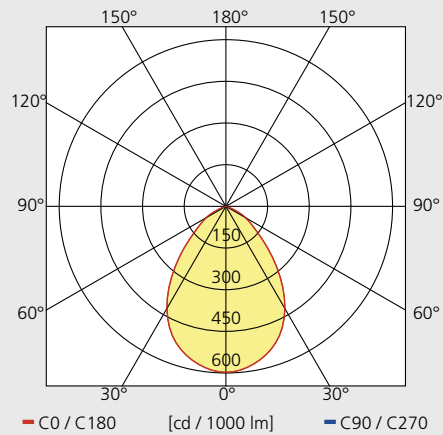


Illustration 5.8:
Plafonnier encastré

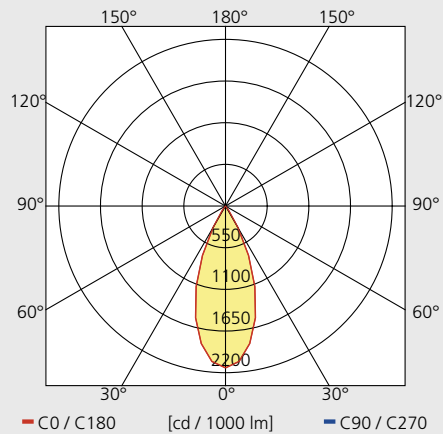
- Nom: Opalis
- Fabricant: Fluora
- Lampe: LED
- Puissance: 29 W
- Flux lumineux: 3100 lm
- Efficacité: 110 lm/W
- Lumière directe: 100 %
- Rendu des couleurs $R_a > 80$
- Température de couleur 4000 K
- Minergie: Flu-0017

Illustration 5.9:**Downlight**

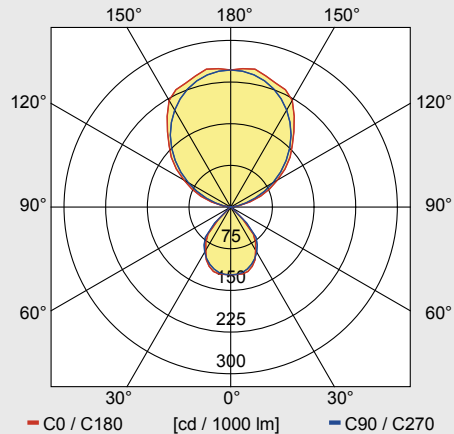
- Nom: Panos infinity
- Fabricant: Zumtobel
 - Lampe: LED
 - Puissance: 19 W
 - Flux lumineux: 2700 lm
- Efficacité: 138 lm/W
 - Lumière directe: 100 %
- Rendu des couleurs $R_a > 90$
 - Température de couleur 3000 K
- Minergie: Zu-0779

**Illustration 5.10:****Projecteur**

- Nom: Matrix
- Fabricant: Regent Lighting
 - Lampe: LED
 - Puissance: 24 W
 - Flux lumineux: 2750 lm
- Efficacité: 115 lm/W
 - Lumière directe: 100 %
- Rendu des couleurs $R_a > 80$
 - Température de couleur 4000 K
- Minergie: Re-0111

**Illustration 5.11:****Luminaire domestique**

- Nom: Fez
- Fabricant: Baltensweiler
 - Lampe: LED
 - Puissance: 35 W
 - Flux lumineux: 3200 lm
- Efficacité: 92 lm/W
 - Lumière directe: 45 %
- Rendu des couleurs $R_a > 90$
 - Température de couleur 2700 K
- Minergie: Ba-0009



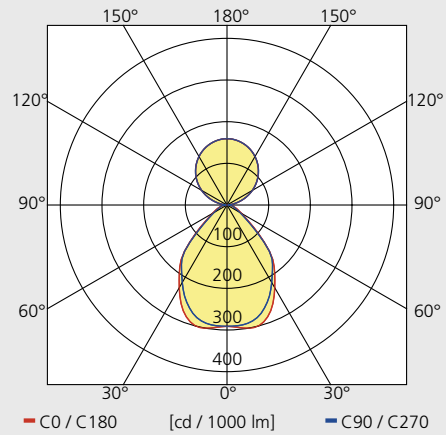


Illustration 5.12:
Luminaire suspendu

- Nom: Eco E
- Fabricant: Neuco
- Lampe: LED
- Puissance: 72 W
- Flux lumineux: 9400 lm
- Efficacité: 132 lm/W
- Lumière directe: 55 %
- Rendu des couleurs $R_a > 80$
- Température de couleur 4000 K
- Minergie: Ne-0083

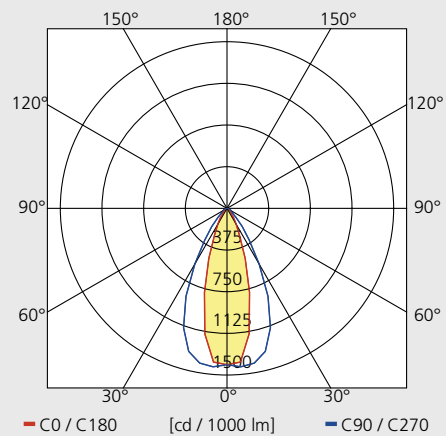


Illustration 5.13:
Luminaire industriel

- Nom: Craft
- Fabricant: Zumtobel
- Lampe: LED
- Puissance: 138 W
- Flux lumineux: 21 200 lm
- Efficacité: 154 lm/W
- Lumière directe: 100 %
- Rendu des couleurs $R_a > 80$
- Température de couleur 4000 K
- Minergie: Zu-0785

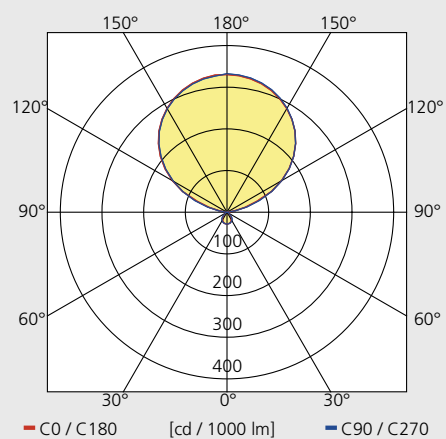


Illustration 5.14:
Lampe sur pied

- Nom: Gottardo
- Fabricant: S-TEC electronics
- Lampe: LED
- Puissance: 94 W
- Flux lumineux: 14 000 lm
- Efficacité: 148 lm/W
- Lumière directe: 5 %
- Rendu des couleurs $R_a > 85$
- Température de couleur 4000 K
- Minergie: S-Tec-0005

5.3 Mesure des luminaires

La mesure professionnelle de la répartition lumineuse des luminaires est effectuée par un photogoniomètre. Le mode de fonctionnement du goniomètre est décrit dans le paragraphe 3.5. Les luminaires coûteux et compliqués sont utilisés pour effectuer des mesures précises, très difficiles en raison de la différence de taille entre les lampes et les luminaires plus grands. La difficulté est manifeste pour les lampes fluorescentes. Il existe trois types de photogoniomètres:

■ Le photogoniomètre à miroir tournant: La source lumineuse tourne autour d'un axe

vertical. La tête du photomètre est fixe et capte la source via un miroir qui tourne autour d'un axe horizontal. **Avantage:** méthode de mesure très précise, même pour les types de lampes dépendant fortement de la température et de l'emplacement. **Inconvénient:** mécanique laborieuse, grandes exigences concernant la qualité du miroir et coûts élevés. **Exemple:** Metas Bern (Illustration 5.16).

■ **Photogoniomètre avec capteur mobile:** La source lumineuse tourne autour d'un axe vertical, la tête du photomètre se déplace autour d'un axe horizontal sur lequel est fixé l'objet à mesurer. **Avantage:** méthode de mesure très précise, même pour les types de lampes dépendant fortement de la température et de l'emplacement. **Inconvénient:** grand besoin de place en raison de la distance élevée entre le capteur et l'objet (pour les luminaires intérieurs 10 à 15 m) et coûts élevés. **Exemple:** Zumtobel, Dornbirn (Illustration 5.15).

■ **Photogoniomètre en champ proche:** En principe, similaire au mouvement de la tête du photomètre dans le dispositif avec capteur mobile. Au lieu du photomètre, une caméra numérique est utilisée. La courbe de répartition lumineuse est calculée à partir des différents points de l'image et de la géométrie de la pièce. **Avantage:** méthode de mesure précise et faible besoin de place. **Inconvénient:** étalonnage laborieux et coûts relativement élevés. **Exemple:** Regent Bäle

Illustration 5.15:
Principe d'un photogoniomètre avec mouvement de la tête du photomètre (Zumtobel, Dornbirn).

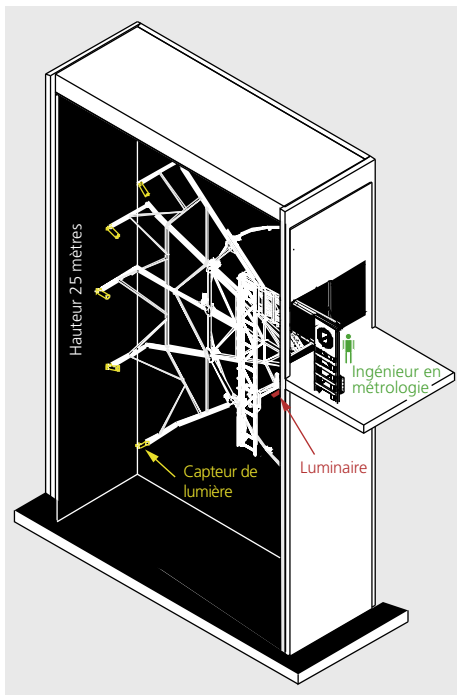
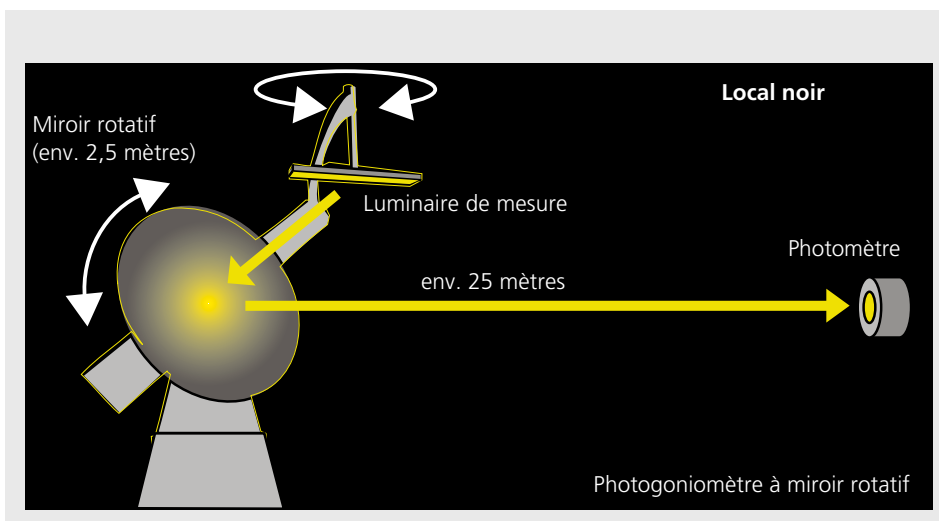


Illustration 5.16:
Principe d'un photogoniomètre à miroir rotatif (Metas, Berne).



5.4 Luminaires Minergie

Les luminaires Minergie se caractérisent par leur grande qualité et leur bonne efficacité énergétique. Seuls les luminaires qui sont certifiés par l'autorité compétente sont autorisés à s'appeler luminaires Minergie. Le label Minergie est une marque déposée. L'Agence suisse pour l'efficacité énergétique (S.A.F.E.) est la seule autorité de certification agréée. Pour que les luminaires puissent être certifiés, le fabricant doit disposer d'un système d'assurance qualité éprouvé (ISO 9000 ou similaire). Tous les luminaires doivent être évalués et documentés dans un laboratoire de mesure accrédité (selon EN ISO/IEC 17025) suivant des directives exactement prédéfinies (selon EN 13032). Seuls les fabricants autorisés par la commission des labels pour les luminaires Minergie peuvent faire certifier des luminaires.

Efficience énergétique d'un luminaire

L'efficacité lumineuse du luminaire est utilisée comme facteur pour mesurer l'efficacité énergétique d'un luminaire Minergie. Il s'agit du quotient du flux lumineux total et de la puissance du système d'un luminaire. Un luminaire se compose d'un module LED, d'un ballast et d'un réflecteur pour le guidage de la lumière et le contrôle de l'éblouissement. Certains luminaires ont par ailleurs, un détecteur de lumière intégré. Le produit de l'efficacité lumineuse du module LED, de l'efficacité du

réflecteur et du ballast est également appelé indice d'efficacité du luminaire «LEF», voir Illustration 5.17.

Exigences concernant le facteur d'efficacité des luminaires

La norme SIA 387/4 sert de base à la définition des exigences: 2017 (Électricité dans les bâtiments – Illumination: Calcul et exigences), chapitre 4.2 Performances ponctuelles requises. Les exigences pour les luminaires Minergie dépendent des facteurs suivants:

- Type de luminaire
- Flux lumineux
- Couleur de la lumière
- Indice de rendu des couleurs.

Pour un luminaire sur pied avec une couleur de lumière de 4000 kelvins et un indice de rendu des couleurs de 80, l'exigence Minergie est illustrée dans le diagramme en fonction du flux lumineux (Illustr. 5.18). Pour les autres types de luminaires, de couleurs de lumière ou de rendu des couleurs, les exigences diffèrent de celles de la fonction de base. L'efficacité lumineuse requise est multipliée par le pourcentage indiqué au tableau 5.2. L'illustration 5.19 montre l'évolution de l'efficacité énergétique des luminaires Minergie depuis leur initialisation en 2007: la valeur moyenne (colonnes bleues) a augmenté d'environ 70 %, la meilleure valeur (ligne rouge) de 100 %.

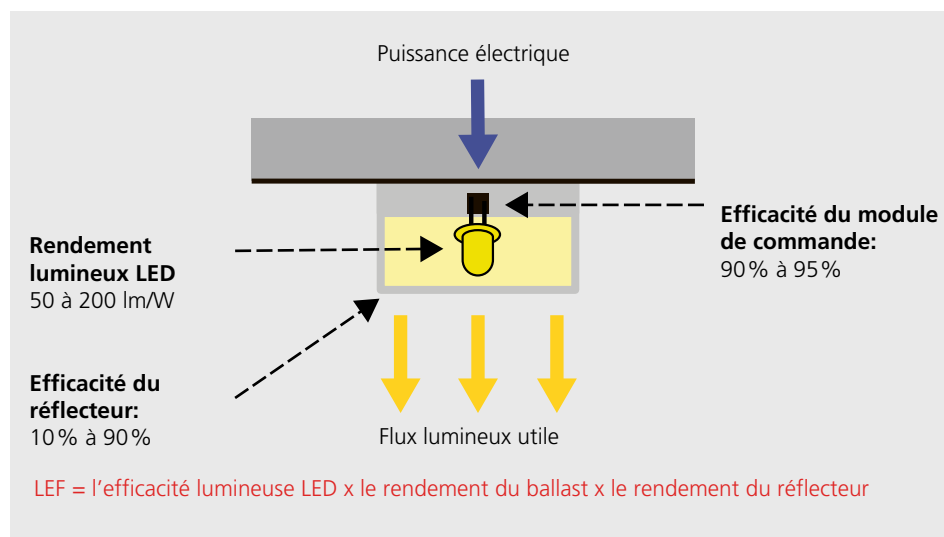


Illustration 5.17:
Définition du facteur d'efficacité du luminaire.

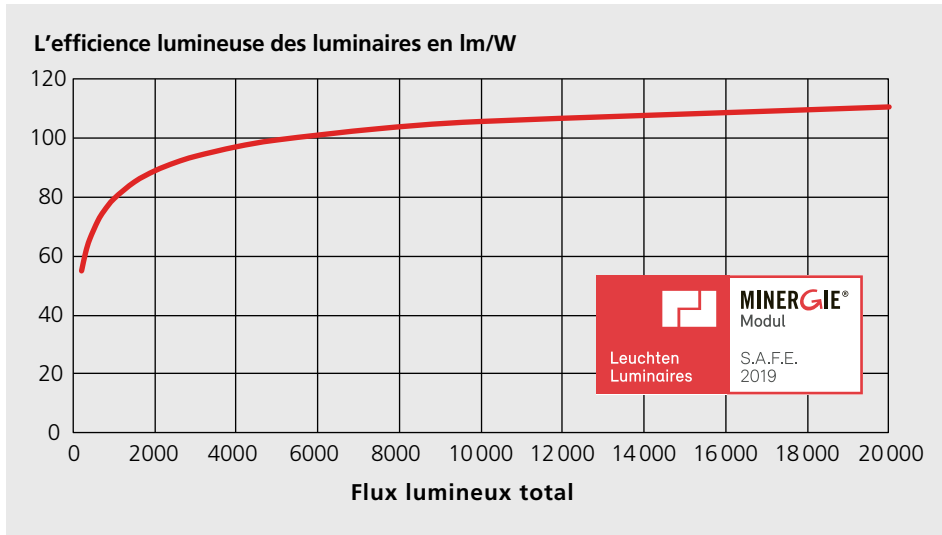


Illustration 5.18: Exigences minimales pour les luminaires Minergie (fonction de base).

Type de luminaire	Index de rendu des couleurs R _a	Température de couleur (kelvin)	Correction de la fonction de base
Plafonniers, luminaires suspendus, lampadaires	80	4000	100 %
	80	3000	95 %
	90	4000	90 %
	90	3000	86 %
Downlights, luminaires étanches, projecteurs/spots, Wallwasher, appliques, luminaires domestiques	80	4000	90 %
	80	3000	86 %
	90	4000	81 %
	90	3000	77 %
Luminaires industriels	–	–	110 %

Tableau 5.2: Facteur de correction dans les exigences des index de rendu des couleurs et de la température de couleur.

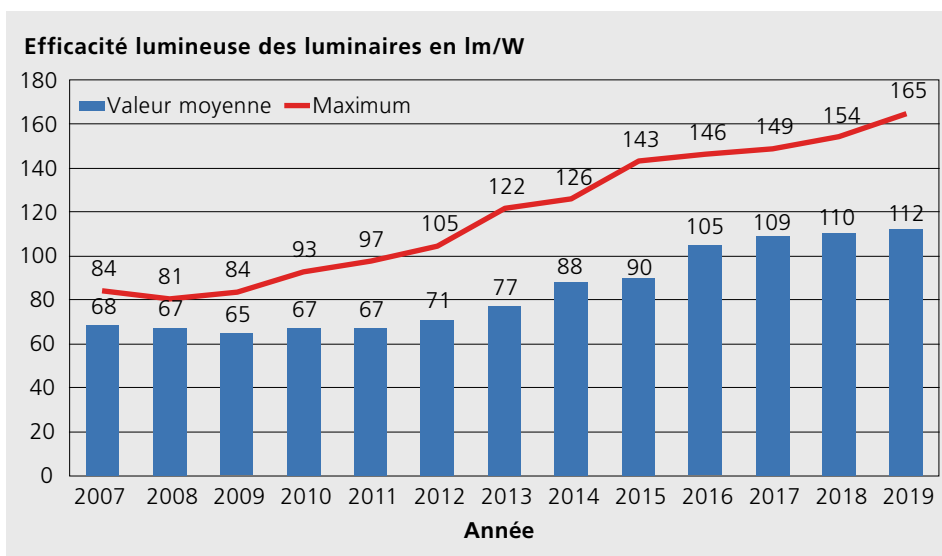


Illustration 5.19: Développement de l'efficacité énergétique des luminaires Minergie depuis leur lancement en 2007.

Puissance en Standby

La puissance électrique en Standby doit être déclarée. Elle est limitée aux valeurs suivantes:

- Luminaires sans détecteur et non réglables: 0 W
- Luminaires graduables: 0,5 W par ballast
- Avec détecteur de lumière du jour et de présence sans communication: 0,5 W (le ballast est déconnecté du réseau par l'intermédiaire d'un capteur avec un interrupteur électromécanique ou électronique en veille)
- Avec détecteur de lumière du jour et de présence intégré et communication simple: 1,0 W le ballast est relié à un système de communication – comme p.ex. DALI – avec un capteur ou un actuateur. Les commandes du déclencheur mettent le luminaire dans différents états de fonctionnement par l'intermédiaire d'un câble de communication – enclenché, réglé, standby. Le module de commande ne peut pas enclencher ou déclencher le réseau électrique.
- Avec détecteur de lumière du jour et de présence intégré et communication multiple: 1,5 W le système d'éclairage se compose de plusieurs éléments: module de commande, module de commande avec capteur ou actuateur. Le module de commande utilise un ou plusieurs systèmes de communication (p.ex. DALI, Modbus) pour influencer et interroger les éléments connectés. En même temps, le module de commande peut activer et désactiver l'alimentation des appareils de commande, des capteurs et des actionneurs.

Limites de l'éblouissement

- Deux valeurs UGR doivent être spécifiées (champ de vision perpendiculaire ou parallèle à l'axe du luminaire). Echelle en 5 classes: <13, <16, <19, <22, <25.
- Les limites de l'éblouissement d'un luminaire selon les UGR des standards des luminaires Minergie: maximum 25 (exceptions: spots, projecteurs, Wallwasher).

Remarque: Si les dimensions de la pièce et les niveaux de réflexion ne sont pas connus au moment de la planification, une

situation de référence peut être utilisée pour calculer la valeur UGR. Comme référence, les dimensions relatives 4H/8H d'un local moyen sont définies pour la combinaison des niveaux de réflexion 0,7 / 0,5 / 0,2. La distance entre les luminaires est de $\frac{1}{4}$ de la hauteur de montage ($S = 0,25$) – voir la publication n° 20 du LiTG.

Autres exigences

- L'indice de rendu des couleurs R_a (ou IRC) doit atteindre au moins 80 R_a , en plus, l'exigence pour le rouge saturé $R9 > 0$ est également applicable ($R_a > 70$ pour les luminaires avec une température de couleur > 6000 K).
- La durée de vie minimale des luminaires Minergie doit atteindre 30 000 heures (F50 selon IEC 62717 ou EC 62722-2-1). Aucune panne n'est admissible dans les 3000 premières heures. Après 6000 heures, 10 % de pannes sont admissibles et le flux lumineux doit encore atteindre au moins 95 % du flux lumineux de départ.
- Dans le cas d'un luminaire LED à température de couleur variable, celui ayant le rendement énergétique le plus faible (généralement blanc chaud) est indiqué; les valeurs d'efficacité énergétique se rapportent également à cette température de couleur. Des informations sur la modulation de température peuvent être données dans le texte descriptif.
- La tolérance d'emplacement de couleur (selon MacAdam) ne doit pas dépasser = 3 SDCM (écart-type de la correspondance des couleurs).
- Les exigences relatives au facteur de puissance selon la directive européenne 1194/2012 s'appliquent.

Liste des luminaires Minergie sur www.toplicht.ch

Le site Internet www.toplicht.ch recense tous les luminaires Minergie certifiés. Les luminaires peuvent être sélectionnés par fabricant, catégorie de lampe et de luminaire, nom du luminaire, puissance et système de réglage. Une option «Comparer» permet à l'utilisateur de comparer des luminaires semblables de fabricants différents avec leurs critères de sélection.

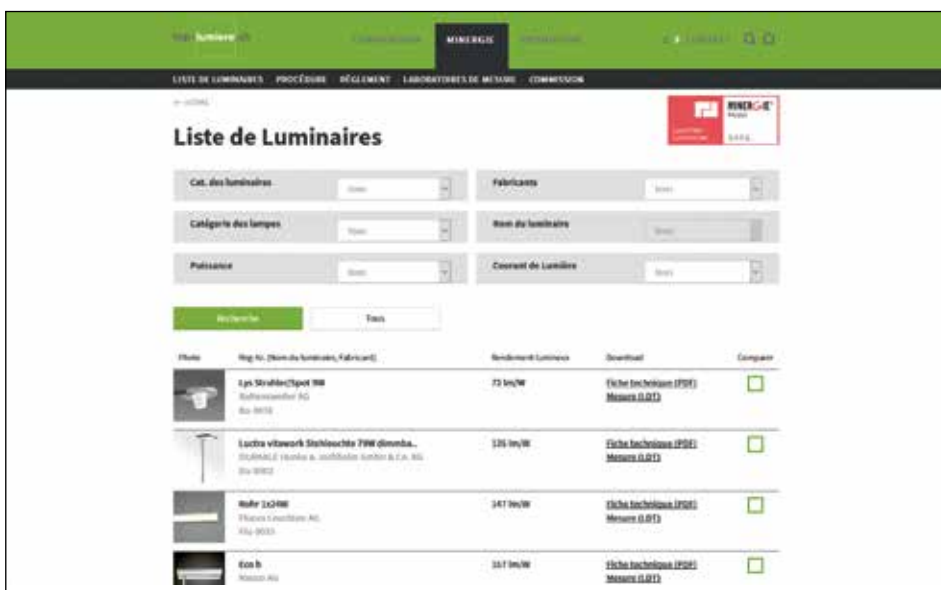



Illustration 5.20: Liste des luminaires sur www.toplicht.ch.




Leuchten
Luminaires

MINERGIE® -Leuchte


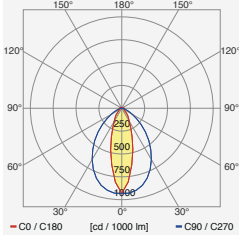

Reg. Nr. Zu-0786
Reg. Datum 28.02.2019

Vergl. www.toplicht.ch



Amphibia Nassraumleuchte 40W

LED-Feuchtraumwannenleuchte in Schutzart IP66 mit Drip-Edge-Effekt zur Minimierung von Schmutz und Staubablagerungen für höchste hygienische Anforderungen. Gesamtleistung: 39,8 W, mit LED-Konverter; Patentiertes InvisiClick für cliploses Montieren und Öffnen der Abdeckung, Abdeckung und Grundwanne aus Polymethylmethacrylate schlagfest, Temperatur und UV-beständig aus einem Stück gespritzt. LED-Lebensdauer 50000 h bis zu einem Lichtstromrückgang auf 90 % des Anfangswertes. Farbortoleranz (initial MacAdam): 3. Leuchten Lichtstrom: 6380 lm, Leuchten Lichtausbeute: 160 lm/W, Farbwiedergabe Ra > 80, Farbtemperatur 4000 K. Symmetrisch eng abstrahlende Leuchte (narrow beam). Montage über V2A Standard-Halteschrauben an Decke, Wand oder Tragschiene. 5-polige Steckverbindungsklemme. Umgebungstemperatur: -10°C bis +35°C. Zugelassen für den Einsatz in Innenbereichen in vertikaler und horizontaler Wandmontage (siehe Montageanleitung). Hinweis: Vor Spezifikation für den Einsatz in Umgebungsatmosphären mit chemischer Belastung, hoher oder kondensierender Luftfeuchtigkeit sowie großen Temperaturschwankungen nehmen Sie bitte Kontakt mit Ihrem Berater auf. Entspricht den Vorgaben internationaler Standards der Lebensmittelindustrie. Designed for BESA box. Zugelassen für den Einsatz in Umgebungen, in denen eine Ablagerung von leitfähigem Staub auf der Leuchte erwartet werden kann (EN 60598-2-24). Schutzklasse: SC1, 650°C Glühdrahtgeprüft, beständig gegen Ammoniak und Reinigungsmittel in der FOOD-Industrie. Leuchte halogenfrei verdrachtet und silikontfrei, Schlagfestigkeit: IK03, Abmessungen: 1600 x 90 x 92 mm; Gewicht: 3,2 kg.

Leuchtenkategorie	Nassraumleuchte
Lampenkategorie	LED
Betriebsgerät	integriert
dimmbar	ja
Lichtregelung	keine
Artikelnummer(n)	42929267, weitere auf www.zumtobel.com/ch-de
Gemessene Leistung (Betrieb / Standby)	40 W / 0,2 W
Gesamlichtstrom 25°	6380 lm
Leuchtenlichtausbeute (Anforderung)	160 lm/W (100 lm/W)
Anteil Direktlicht	94 %
Blendklasse UGR im Standardraum	<22 / <16 (längs/quer)
Max. Leuchtdichte über 65°	max. 89 cd/m²
Farbtemperatur	4000 K
Farbwiedergabeindex Ra	>80
Farbtoleranz nach MacAdams	3
Lebensdauer	100000 h
Messung	Zumtobel AG, 20.02.2018 / Scheffknecht Erich
EULUMDAT-Datei	42929267_(STD).ldt, original

Illustration 5.21: Certificat d'un luminaire Minergie.

En cliquant sur les détails, il est possible, pour chaque luminaire, de télécharger tous les fichiers Eulum ainsi que la fiche technique standardisée du luminaire. En plus de la publication des luminaires de bonne qualité, ce site Internet sert également à l'enregistrement des luminaires, fabricants et laboratoires de mesure. La certification des nouveaux luminaires s'effectue exclusivement en ligne via ce portail (Illustration 5.20).

Laboratoires de mesure

Un laboratoire de mesure agréé pour les certifications Minergie doit répondre aux normes suivantes et être accrédité auprès de l'autorité compétente (en Suisse: www.sas.ch).

- EN ISO/IEC 17025: Exigences concernant les laboratoires d'étalonnage et d'essais

- SN EN 13032: Mesure et présentation des caractéristiques photométriques des lampes et luminaires, Partie 1: Mesure et format des données, Partie 4: lampes LED, modules et luminaires.

- Les mesures effectuées par un laboratoire public autorisé sont acceptées. En Suisse, il s'agit en l'occurrence de l'Office fédéral de métrologie, www.metas.ch.

- Les laboratoires de mesure ci-dessous sont accrédités selon la norme EN ISO/IEC 17025 et sont autorisés à effectuer des mesures conformes à Minergie:

- Office fédéral de métrologie METAS, Berne-Wabern, www.metas.ch

- Dial GmbH, Lüdenscheid près de Francfort a.M. (D), www.dial.de

- Lichttechnisches Institut Karlsruhe der Universität Karlsruhe, Karlsruhe (D), www.lti.uni-karlsruhe.de, www.lti.kit.edu

- SZ Lichtlabor, Klinga près de Leipzig, www.szlichtlabor.de

- VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Offenbach, www.vde.com

- Zumtobel Lighting GmbH, Dornbirn (A), www.zumtobel.com

- Regent Beleuchtungskörper AG, Bâle, www.regent.ch

Commande et régulation

6.1 Bases

Lorsqu'un éclairage doit être exploité en fonction des besoins, on emploie des commandes et des régulations. Tandis que pour un réglage lumineux, l'éclairement lumineux est mesuré et confirmé à l'électronique de réglage en retour, la commande lumineuse fonctionne sans réaction directe (Illustration 6.1). Les commandes lumière sont des horloges et des minuteries tout comme la commande de la lumière constante pour laquelle le capteur de lumière se trouve en dehors du local, sur la façade ou sur le toit. Les détecteurs de présence et de lumière du jour appartiennent aux systèmes de gestion de la lumière, qui reçoivent un retour d'information sur la présence de personnes ou de lumière du jour par des capteurs installés dans la pièce. Qu'il s'agisse de régulation ou de commande, il faut trois éléments pour un système de gestion de la lumière: un émetteur de signaux (p. ex. capteur de lumière du jour), un câble pour la transmission du signal (p. ex. avec le protocole DALI) et une électronique de régulation ou de commande. Il est à noter que plus de 85 % de toutes les installations d'éclairage sans système de gestion de la lumière sont actuellement commandées directement par un signal basse tension (230 volts), soit par un détecteur de mouvement ou

de présence, soit par un autre composant de commande simple (p. ex. horloge ou minuterie).

Transmission du signal

Le capteur transmet l'information sur la présence de personnes ou de lumière du jour au régulateur et de là à la source lumineuse. Ce qui est effectué physiquement avec un signal de basse tension via une liaison de commande simple. Afin que les informations des nombreux capteurs puissent être transmises aux différents régulateurs et sources de lumière via un seul et même fil, les signaux sont adressés. En général, ceci est effectué avec un protocole de transmission ou de réseau. Ainsi, le signal arrive effectivement au bon endroit, pour le régulateur A ou le luminaire B.

Les protocoles de réseau les plus importants:

- **DALI:** Digital Addressable Lighting Interface (lumières et stores).
- **KNX:** Diminutif de Konnex (lat. pour liaison), système de bus standardisé de l'automatisation de bâtiment.
- **EIB:** Bus d'installation européen (installations techniques du bâtiment). Le standard KNX remplace aujourd'hui EIB.
- **LON:** Local Operating Network (installations techniques de bâtiments générales).

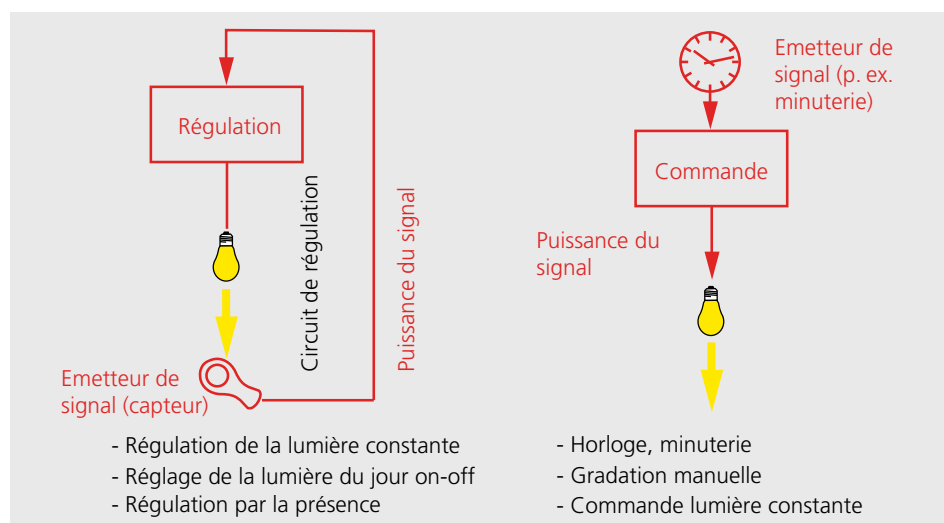


Illustration 6.1: Différence entre régulation et commande.

■ **Luxmate:** Solution réseau de la société Zumtobel.

■ **Digitalstrom:** Commande des installations technique avec transmission de données via le réseau basse tension.

■ **TCP/IP:** Transmission Control Protocol (Internet).

DALI est le protocole réseau le plus répandu dans l'éclairagisme. DALI possède une structure très simple et la communication passe directement entre les capteurs, les interrupteurs et les ballasts électroniques (B.E.). Chaque dispositif de fonctionnement équipé de l'interface DALI peut être commandé individuellement via des adresses abrégées DALI. Grâce à un échange de données bidirectionnel, un dispositif de commande DALI (DALI-Gateway) peut appeler le statut de lampes ou de dispositifs de fonctionnement d'un luminaire et respectivement en définir l'état. DALI peut fonctionner avec 64 dispositifs maximum en tant que «système autonome» ou en tant que sous-système via des passerelles DALI (Illustration 6.2) dans des systèmes d'automatisation de bâtiments (KNX, LON). DALI utilise un protocole de données asynchrone en série avec un taux de transmis-

sion de 1200 bits/s à un niveau de tension de 16 V. Le système de transmission est facile et utilisable universellement:

■ La liaison de commande à 2 fils est isolée galvaniquement et à polarisation réversible.

■ La norme ne pose aucune condition en ce qui concerne le type de prises, de bornes et de câbles utilisés.

■ Les câbles peuvent être posés dans presque n'importe quelle topologie, à savoir les structures en étoile, linéaires ou en arbre (les liaisons annulaires sont à éviter).

■ La longueur de câble entre deux composants système est limitée à 300 m maximum (en fonction de la section conduite).

■ Aucune résistance terminale n'est nécessaire à l'extrémité d'un câble.

Le développement de DALI vers «DALI-2» apporte quelques améliorations: connectivité améliorée, nouvelles fonctionnalités, spécifications et corrections plus précises pour les erreurs connues dans l'ancien système DALI. La nouvelle norme DALI-2 standardise, entre autres, la communication des capteurs dans les systèmes DALI. Cela garantit la compatibilité entre tous les fabricants. DALI-2 permet aux capteurs de transmettre les données recueillies aux principaux systèmes de gestion de l'éclairage. Jusqu'à 64 luminaires avec jusqu'à 64 capteurs dans un maximum de 16 groupes et 16 scènes peuvent ainsi être reliés entre eux.

Electronique de régulation et de commande

L'électronique de régulation et de commande traite les valeurs de mesure des capteurs qui arrivent via les câbles de signaux et commute un relais (marche ou arrêt) ou un gradateur (intensité électrique continue). Pour les détecteurs de mouvement et de présence les plus répandus avec commutation marche-arrêt (PIR) dépendant de la lumière intégrée, l'électronique de régulation est directement intégrée dans le capteur (Illustration 6.3).

Illustration 6.2: Appareil de commande (Gateway) pour participants DALI: luminaires, capteurs, interrupteur.



Illustration 6.3: Ballasts électroniques avec régulateur DALI.



Système de gestion de la lumière

Plusieurs circuits de régulation ou commandes regroupés constituent un système de gestion de la lumière. Il coordonne les capteurs et les dispositifs de fonctionnement des luminaires et forme une interface vers un système maître d'automatisation des bâtiments ou vers l'Internet. Le dispositif de commande (passerelle) qui regroupe les différentes régulations est la plupart du temps installé dans les tableaux de distribution électrique.

6.2 Détecteurs de mouvement et de présence

Les détecteurs ou capteurs de présence sont utilisés pour détecter la présence de personnes (et entre autres, d'animaux ou de véhicules). Quatre technologies différentes sont actuellement disponibles:

■ **Capteur infrarouge passif (PIR)**: réagit aux sources de chaleur en mouvement.

■ **Capteur haute fréquence (5,8 GHz)**: détecte les mouvements même à travers des parois minces (par ex. dans les WC).

■ **Détecteur à ultrasons (40 kHz)**: détecte également les objets dans la pièce sans contact visuel direct avec le détecteur (p. ex. un employé derrière une plante de bureau).

■ **Capteur optique (caméra)**: peut compter des personnes en plus de la détection de présence, par exemple.

Outre le terme «détecteur de présence», le terme «détecteur de mouvement» est également utilisé. Fondamentalement, les deux appareils ont la même fonction, à savoir la détection de mouvement. La précision de la détection et le prix d'achat font la différence: dans les locaux avec des mouvements importants (p. ex. dans les zones de circulation) les détecteurs de mouvement bon marché sont suffisants, alors que dans les locaux avec peu de mouvements (p. ex. un bureau ou une salle de classe) un détecteur de présence est nécessaire. Le parfait détecteur de présence devrait signaler une personne, même sans mouvement.



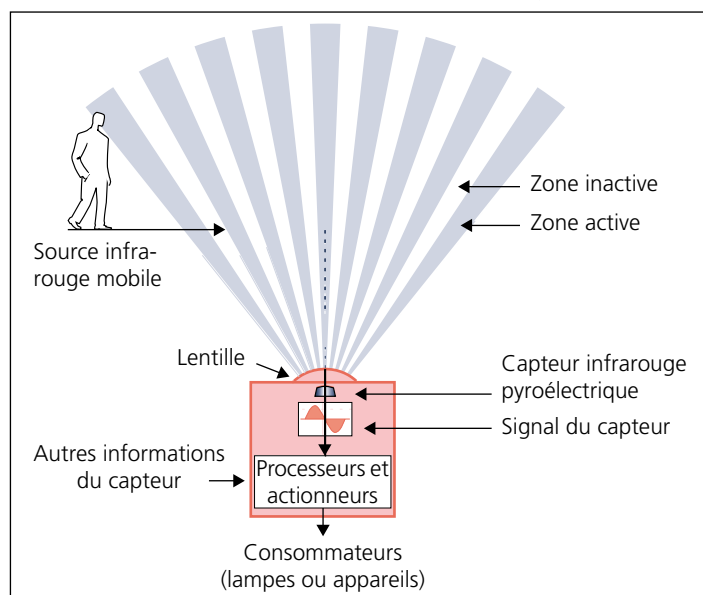
Illustration 6.4:
Exemples de PIR:
montage mural, au
plafond ou sur in-
terrupteur. (Source:
Swisslux)

Capteur infrarouge passif (PIR)

Aujourd'hui, la plupart des détecteurs de mouvement usuels fonctionnent selon le principe de la mesure infrarouge. Si une source de chaleur se déplace dans la zone de détection du capteur, le détecteur la perçoit et l'interprète comme la présence d'une personne ou d'un véhicule dans la pièce surveillée. Chaque être vivant rayonne de la chaleur dans la gamme de fréquences du rayonnement infrarouge, ce qui est invisible pour l'œil humain. Un capteur pyroélectrique – le cœur de chaque détecteur de mouvement – reçoit ce rayonnement et le convertit en un signal électrique qui commande un circuit. Ceci donne une impulsion d'arrêt ou d'allumage à l'interrupteur électronique de l'éclairage. Comme le capteur n'émet pas de signal, mais ne reçoit que ce que les sources de chaleur en mou-

Illustration 6.5:
Schéma de principe
pour le mode de
fonctionnement des
détecteurs de mou-
vement et de pré-
sence PIR. (Source:
Swisslux)

Illustration 6.6:
Rayonnement infra-
rouge d'un être hu-
main: plus il y a de
chaleur, plus la zone
sur l'image IR est
rouge.



vement émettent, on l'appelle un capteur infrarouge passif (capteur PIR). Comme il y a généralement d'autres objets dans une pièce que des personnes qui émettent de la chaleur (p. ex. lampes, radiateurs, appareils électriques), les détecteurs de mouvement possèdent un système optique qui garantit que seules les sources infrarouges en mouvement sont détectées. Le système optique se compose d'une lentille multiple qui divise la zone de détection en zones actives et non actives. Dès qu'une source de chaleur passe d'une zone active à une zone inactive (ou vice versa), le capteur réagit et envoie l'information au circuit électronique. Si aucun signal n'est reçu pendant un temps défini (p. ex. 5 minutes), l'électronique interprète cela comme une «absence de personnes» et envoie une impulsion de coupure à l'éclairage ou à d'autres consommateurs d'énergie tels que les systèmes de chauffage, ventilation, climatisation et protection solaire automatique. L'impulsion de mise en marche est la même que l'impulsion inverse. L'appellation «détecteur de mouvement» est aussi utilisée pour la notion de «détecteur de présence». Le principe est le même; la sensibilité et la précision des détecteurs de présence sont plus élevées, de sorte que même de très petits mouvements (p. ex. de personnes assises) peuvent être captés (Illustration 6.5).

Avantages des PIR

- Un état très avancé de la technique
- Claire limitation de l'espace dans la zone de détection
- La zone de détection peut être limitée à l'aide de caches et en réglant la lentille
- Détection tangentielle distincte du mouvement
- Très grand choix de produits et de fournisseurs.

Inconvénients des PIR

- Pas de détection lorsqu'une personne est cachée (p. ex. derrière une plante ou une cloison)
- Possibilité de commutation défectueuse due à d'autres sources de chaleur fortement changeantes (p. ex. des ventilateurs puissants, etc.)

■ La détection radiale des personnes (personne se déplaçant vers le PIR) est significativement inférieure à la détection des mouvements tangentiels. Il faut en tenir compte lors de l'installation des détecteurs.

Dans les couloirs, les PIR devraient être installés au plafond plutôt vers le milieu de l'espace. Comme les personnes dans les couloirs se déplacent habituellement radialement vers les PIR, la détection est moins efficace qu'elle ne le serait si elle était montée sur le mur.

Points importants pour la conception et le montage intelligent d'installations PIR

■ Quel PIR fait sens? Il existe nombre de variantes: Pour un montage mural, au plafond ou à la place d'un interrupteur. Quelle précision et quelle logique de régulation de l'éclairage? L'industrie différencie les détecteurs de présence et de mouvement; mais le principe reste le même. Cependant, leur fonction n'est pas identique en termes de sensibilité de détection et de logique de régulation de la lumière.

■ Localisation et placement: Que doit capter ou non un PIR? Un détecteur PIR doit être placé avec soin, tout comme un détecteur de fumée! Le détecteur de présence du fournisseur «Swisslux» (voir www.swisslux.ch, sous «downloads») offre un matériel d'aide complet et de qualité pour la sélection et l'installation correctes des détecteurs de mouvement et de présence.

■ Les détecteurs PIR peuvent-ils être connectés en parallèle? Ou bien les détecteurs sont-ils installés en tant qu'appareils «Master et Slave»? (Le maître est le capteur principal et effectue la mesure de la lumière, les esclaves sont des capteurs secondaires sans mesure de la lumière). Quels capteurs doivent effectuer le réglage séparément (Master sans Slave, Illustration 6.9)?

Tableau 6.1:
Valeurs-types pour
ajuster les détec-
teurs de présence
selon le champ
d'application.

Utilisation	Luminosité	Temps de déclenchement
Zone extérieure	20 lux	1 à 2 minutes
Zones de passage (couloirs)	150 lux	2 à 5 minutes
Espace de travail	600 lux	5 à 7 minutes
Activités à forte concentrat. visuelle	1000 lux	5 à 10 minutes

■ **Distance:** Les fabricants indiquent les zones d'enregistrement qui doivent être considérées comme distances idéales. La sensibilité du PIR diminue fortement avec la distance. Lors de la planification des détecteurs PIR, il faut toujours tenir compte de la déclaration des plages de détection du fabricant respectif (Illustration 6.8).

■ **Ajustement et contrôle de fonctionnement:** quel que soit le coût, chaque PIR doit être ajusté et testé. Les deux points déterminants pour un impact économique des détecteurs de présence sont le **temps de déclenchement** et le **seuil de luminosité**. D'une part, le temps écoulé entre la dernière détection de personne et l'impulsion d'extinction de l'éclairage et, d'autre part, le seuil auquel le capteur enclenche la lumière artificielle. Les 15 minutes habituelles des lampes fluorescentes sont si longues, que le potentiel d'économies effectives des détecteurs de présence ne peut pas être exploité à grande échelle

dans la pratique. Pour les luminaires LED, le temps d'enclenchement recommandé est de 2 à 5 minutes maximum. Si le temps de déclenchement est court, le positionnement du capteur est important pour éviter les erreurs de commutation. Le seuil de luminosité doit être choisi en fonction de l'utilisation (Tableau 6.1).

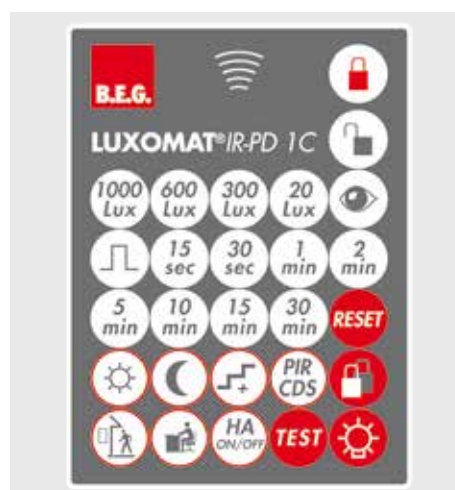


Illustration 6.7: Télécommande pour le réglage d'un détecteur de présence et de lumière du jour combiné. (Source: Swisslux)

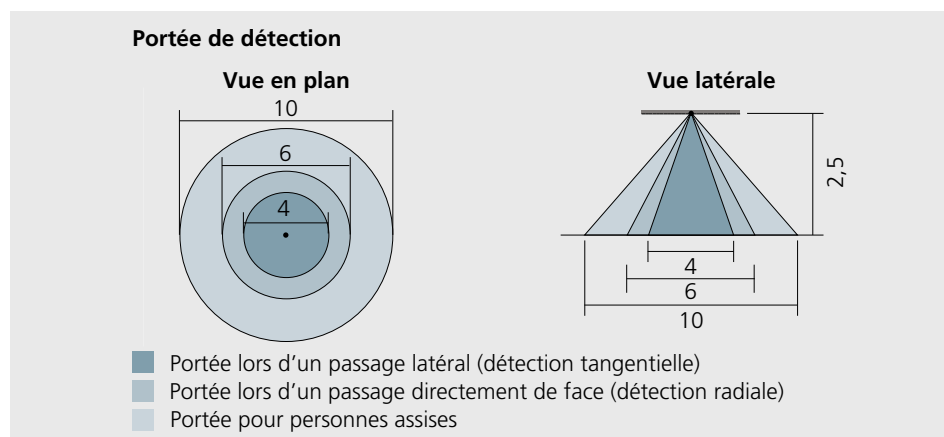


Illustration 6.8: Portée de détection déclarée des capteurs PIR. (Source: Swisslux)

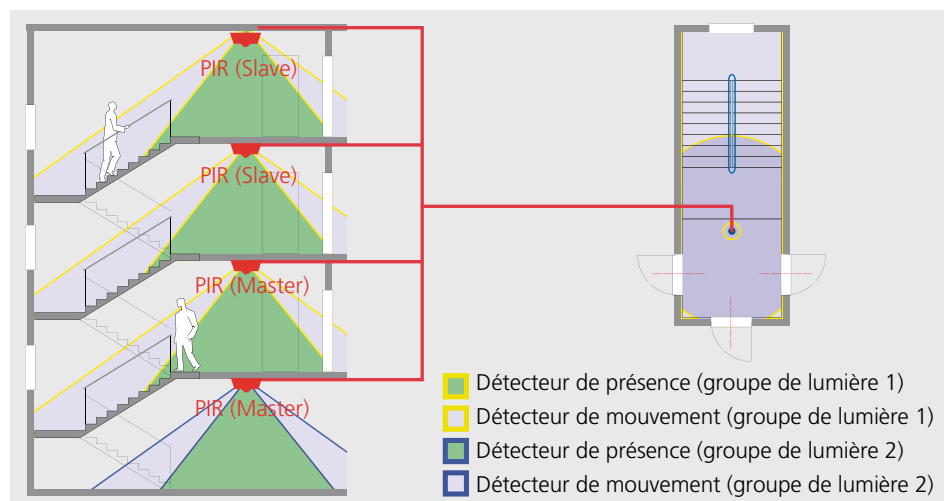


Illustration 6.9: Exemple de planification PIR dans une cage d'escalier. (Source: Swisslux)



Illustration 6.10:
Capteur True-Presence de Steinel.

■ Dans les salles de classe, les petits bureaux ou les salles d'attente, les détecteurs de présence doivent être en mode semi-automatique. Le PIR déclenche automatiquement lorsqu'il n'y a plus personne dans la pièce, par contre, il faut toujours l'enclencher manuellement. Les économies d'énergie sont importantes avec la solution semi-automatique, car la lumière n'est allumée que lorsqu'une personne le souhaite.

Capteur à hautes fréquences (capteur HF)

Contrairement aux capteurs infrarouges passifs, le capteur à hautes fréquences est actif et envoie des ondes électromagnétiques en gamme de gigahertz. Les ondes rayonnent, sont reflétées sur les objets dans la pièce (meubles, appareils, plantes, personnes) et sont renvoyées vers le capteur. Si tout est immobile dans la pièce, les ondes reflétées ont la même fréquence que celles émises. L'onde à haute fréquence reflétée sur une personne en mouvement change de fréquence. Ce changement est reçu par le capteur comme un mouvement. Comme pour le capteur infrarouge passif, il active d'une impulsion de commutation le circuit électronique qui peut enclencher ou déclencher l'éclairage ou d'autres appareils électriques.

Comme les ondes électromagnétiques d'un capteur HF se diffusent aussi dans le verre, le bois ou des parois légères, peuvent capter des zones non visibles dans une pièce, contrairement aux PIR. Il peut aussi arriver qu'une personne soit captée à travers une paroi très mince, alors qu'elle se trouve dans le couloir ou dans une autre pièce. Quelques fabricants travaillent sur des capteurs HF «intelligents», dont la zone de détection devrait être précisément limitée et qui filtrent à l'aide d'un logiciel les objets en mouvement qui ne devraient pas être détectés (p.ex. buissons, arbres, chats). Ce dernier est particulièrement nécessaire pour une utilisation en extérieur.

Avantages des capteurs HF

■ Détection de mouvement également derrière des plantes, des parois amovibles et des portes de WC

■ Détection très sensible de tout petits mouvements également

■ Adapté pour une détection radiale ou tangentielle.

Inconvénients des capteurs HF

■ Réglage exigeant de la plage de détection exacte

■ Détection également des objets en mouvement qui n'émettent pas de chaleur (par exemple, les dispositifs électromécaniques, les rideaux dans le vent, etc.)

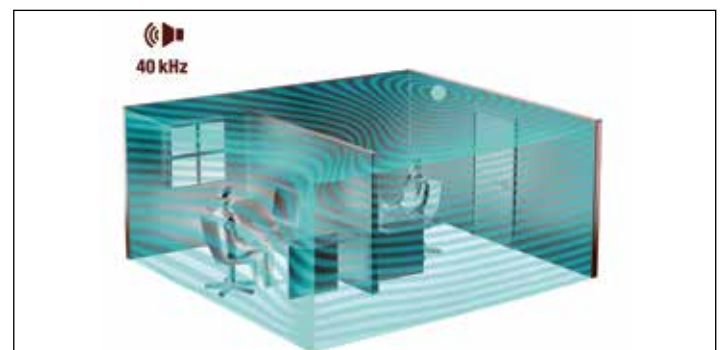
■ (encore) un assortiment et des types réduits.

Sous le nom de «True Presence», la firme Steinel a réalisé un capteur HF si précis, qu'il peut détecter la respiration d'une personne. Installé dans une chambre d'hôtel, il peut détecter si un hôte endormi est toujours dans la chambre afin de ne pas qu'il soit dérangé par l'équipe de nettoyage. Il est concevable qu'un capteur HF encore plus perfectionné puisse même détecter de manière fiable la respiration des patients dans une chambre d'hôpital.

Capteurs à ultrasons (capteurs US)

Une troisième variante de détecteur de présence fonctionne avec des ultrasons. Le capteur intégré envoie un son à une fréquence de 40 kHz, inaudible pour une oreille humaine. Les ondes à ultrasons circulent autour de quasi tous les objets dans une pièce (comme un haut-parleur), sans que la position du capteur ne joue un rôle. Comme pour le capteur HF, le son est réfléchi sur les objets lorsqu'il se produit; pour les objets stationnaires, le son réfléchi reste inchangé, pour les objets en mouvement, la tonalité change. On appelle ce

Illustration 6.11: Les ultrasons entourent tous les objets dans un espace clos.
(Source: Steinel)



principe double-effet: il peut être observé, par exemple avec un véhicule d'ambulance. Si elle s'approche d'une personne, la tonalité de la sirène est plus élevée que si l'ambulance s'en éloigne. Le capteur à ultrasons ne traverse pas les murs, mais peut se faufiler sous une porte, par exemple lorsque les toilettes ne sont pas complètement fermées, et ainsi détecter des personnes. Les principes du capteur US et du PIR se complètent dans certains cas; il existe donc également des capteurs hybrides qui combinent les deux fonctions de manière optimale.

Avantages des capteurs US

- Enregistrement des mouvements dans l'espace – mais pas à l'extérieur de parois fermées
- Convient pour la détection radiale et tangentielle
- Convient pour les grandes superficies et les couloirs.

Inconvénients des capteurs US

- Détectent également les objets en mouvement qui n'émettent pas de chaleur (par exemple, les dispositifs électromécaniques, les rideaux dans le vent).
- Assortiment et types réduits et peu de fournisseurs.

Capteurs optiques (caméras)

Une quatrième possibilité de détecteur de présence, encore peu utilisée, est la version optique via une petite caméra, comme celles qui se trouve aujourd'hui dans tous les smartphones. Les images prises par un appareil photo sont transmises à un petit ordinateur interne au capteur, qui les analyse pour détecter la présence de personnes au moyen d'un traitement d'image. Pour que cela fonctionne, il faut qu'un maximum de photos de personnes, sous tous les angles, soit stocké dans le capteur. L'ordinateur du capteur compare ensuite les images avec les images enregistrées et décide si des personnes sont présentes ou non.

L'avantage de ce système est que les personnes n'ont pas besoin de bouger pour être détectées et que le capteur peut également déterminer le nombre de personnes

dans la pièce. Les capteurs optiques sont particulièrement adaptés à la gestion de bureaux dans des entreprises où les postes de travail sont modulables: les capteurs optiques peuvent, dans un réseau adéquat, fournir au centre de contrôle des informations sur les places de travail libres. Grâce à la haute résolution et à la sensibilité des capteurs optiques des caméras, ils peuvent non seulement détecter les personnes, mais aussi analyser l'utilisation possible de la lumière du jour dans la pièce et réguler l'éclairage beaucoup plus précisément que les capteurs actuellement disponibles.

A l'avenir, les capteurs des caméras pourraient prendre en charge un certain nombre d'autres tâches pour la surveillance et la gestion des bâtiments en plus du contrôle de l'éclairage; ces questions touchent particulièrement la protection des personnes surveillées de cette manière et doivent encore être clarifiées.

Les produits actuels proposés ne transmettent pas d'image au système de gestion du bâtiment, mais seulement le nombre de personnes présentes dans l'espace.

Avantages des capteurs optiques

- Détection de personnes immobiles
- Estimation du nombre de personnes présentes dans un espace
- Définition précise de la surface de détection
- Détection d'autres informations, techniquement possible.

Inconvénients des capteurs optiques

- Installations coûteuses
- Possibilité de dysfonctionnement en raison d'une détection imprécise des personnes
- Questions sur la protection des données.

6.3 Luminaires intelligents en réseau

Depuis que la LED s'est établie dans la masse des applications, un système de commande qui utilise toutes les possibilités de la technologie d'éclairage a une signification encore plus importante. Une économie de 30 à 80 % des heures à

pleine charge peuvent ainsi être économisées, en fonction de l'utilisation. Les recherches montrent qu'une détection précise de la présence de personnes, de l'influence de la lumière du jour et un réglage optimisé en fonction de l'application sont d'une importance capitale. Il est également important, pour un contrôle efficace de l'éclairage, que les groupes d'éclairage soient aussi petits que possible. Cela augmente l'efficacité de l'ensemble du système. Un système de gestion de l'éclairage répond à ces exigences. La planification, l'installation et la mise en service sont complexes et coûteuses, en raison de la structure centrale principale de la commande et des nombreuses possibilités d'architecture du système.

Une alternative pour un système de gestion de l'éclairage se présente sous la forme de luminaire intelligent: Le concept combine des luminaires LED hautement efficaces et un système de gestion de la lumière pour une solution globale. De telles solutions disposent d'une intelligence pour la lumière du jour, la présence, l'heure, les événements et l'éclairage à commande logique, d'une fonction d'éclairage de secours et, si nécessaire, d'entrées supplémentaires pour les signaux de commande externes. Cela simplifie considérablement la planification et la mise en service, car l'installation peut être complétée, réduite ou remplacée à tout moment. Les luminaires peuvent être reliés entre eux par radio ou par câble de données et conviennent donc parfaitement aux nouvelles constructions et aux rénovations. Avec ce concept d'éclairage, la lumière ne s'allume que là où elle est nécessaire et des temps de déclenchement limités assurent une efficacité énergétique maximale. Selon l'utilisation, il existe, par exemple, des programmes de commande prédéfinis qui peuvent être personnalisés avec une «App». La fonction SWARM (intelligence en essaim) est un élément important d'une solution avec des luminaires intelligents. Les groupes de luminaires, qui communiquent de manière linéaire et étendue, sont reliés par une unité de gestion de la lumière. Par regroupement, le

fonctionnement de chaque luminaire peut être programmé individuellement. Plusieurs programmes de commande contiennent déjà des scénarios d'éclairage prédéfinis et permettent ainsi une fonction SWARM pour différents champs d'application. Par exemple, en entrant dans un escalier, non seulement l'étage correspondant est éclairé, mais aussi les étages adjacents. Il en va de même pour les parkings, les couloirs ou les bureaux paysagers dans lesquels la lumière se déplace avec la personne sur tout son parcours. Les luminaires des espaces adjacents sont réglés avec une clarté réduite, ce qui permet une orientation optimale et donne un sentiment de sécurité. Les luminaires intelligents se distinguent des luminaires à détecteur avec commutation marche/arrêt simple en fonction de la lumière du jour, ces derniers ne disposant pas de l'intelligence d'une mise en réseau supplémentaire. Avec les luminaires intelligents, la planification, l'installation et la mise en service sont réduites car toutes les fonctions de commande nécessaires sont intégrées dans le luminaire. L'illustration 6.12 illustre le principe du système de gestion de l'éclairage avec des luminaires intelligents en prenant comme exemple le système «Trivalite» de Swisslux (voir aussi chapitre 8.12).

Commentaire de l'illustration 6.12

- 1: une personne travaille dans un bureau paysager, l'éclairage sur sa place de travail fonctionne à 100 %, les autres sont réglés (10 %, p. ex.).
- 2: une 2^{ème} personne est présente, l'éclairage sur les deux places est à 100 %.
- 3: une 3^{ème} personne s'assied et une 4^{ème} est devant la fenêtre, 4 luminaires sont à 100 %.
- 4: la 4^{ème} personne bouge, l'éclairage suit son déplacement.
- 5: la pièce reçoit la lumière du jour, les luminaires au centre sont allumés, ceux côté fenêtre sont éteints.

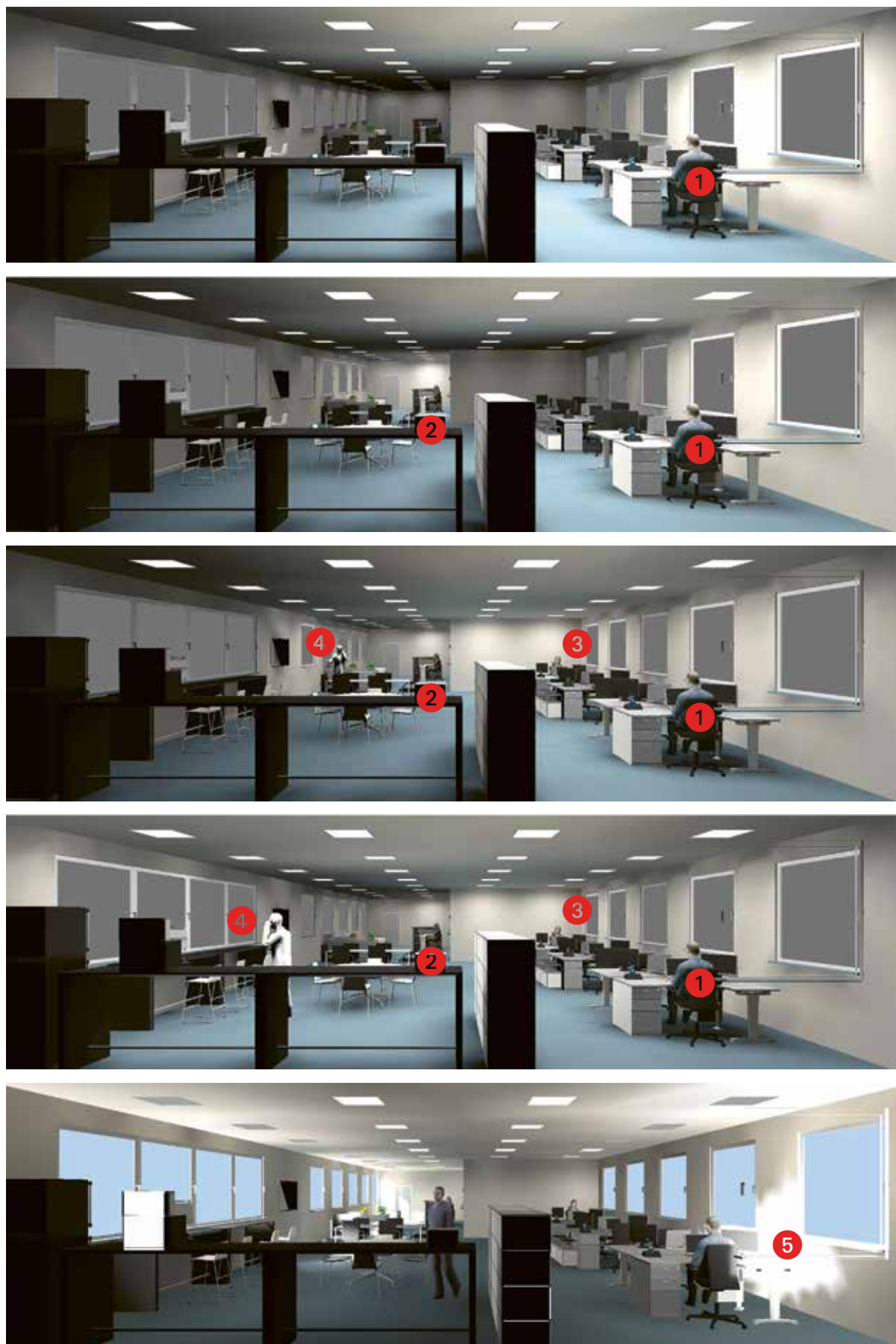


Illustration 6.12: Réseau de luminaires intelligents dans un bureau paysager. (Source: Trivalite de Swisslux)

6.4 Cellule photo pour l'enregistrement de la lumière du jour

Pour la mesure et le réglage de la lumière artificielle en fonction de la lumière du jour, des cellules photoélectriques sont utilisées. Elles réagissent à la lumière visible. Leur principe de fonctionnement correspond à celui de la cellule solaire: si de la lumière tombe sur le capteur, le flux électrique augmente de manière linéaire par rapport à l'intensité lumineuse (Illustration 6.14). Ce flux électrique est converti, via une électronique de réglage, en un signal de réglage pour la déconnexion ou la gradation d'un luminaire. Pour les réglages lumineux avec enregistrement de présence, le capteur de lumière (comme capteur supplémentaire!) est souvent directement intégré dans le détecteur de présence. Les PIR sont dans la plupart des cas des régulateurs dépendant de la lumière du jour et de la présence. L'enregistrement de la lumière du jour se produit toutefois de manière assez rudimentaire, comme avec un appareil photo dont les fonctions permettent seulement la mesure de l'exposition, en général au centre de l'image, sans différencier ni interpréter les différentes zones de luminosité. Ce qui a pour conséquence, en cas de positionnement inadéquat des capteurs, des effets de réglage non souhaités. Que se passe-t-il si sur un tapis noir, un dessus de table clair ou un arbre en caoutchouc est déplacé de temps en temps sous le capteur? Le capteur de lumière interprète très inexactement ce genre de changement. Dans la pratique, il est donc très répandu que les

capteurs ne soient pas ajustés et laissés en réglage d'usine soit réglés sur la luminosité maximale, par sûreté. Ainsi, un réglage dépendant de la lumière du jour n'apporte pas grand-chose.

En plus des cellules photoélectriques intégrées dans le PIR pour l'enregistrement de la lumière du jour, il existe des capteurs autonomes qui fournissent en général un enregistrement plus exact, car ils peuvent être installés de manière aisée pour capter la lumière du jour. On en distingue quatre types qui présentent tous des avantages et des inconvénients (comparaison dans le tableau 6.2).



Illustration 6.14: Capteur de toiture pour commande lumineuse constante. (Source: Zumtobel)

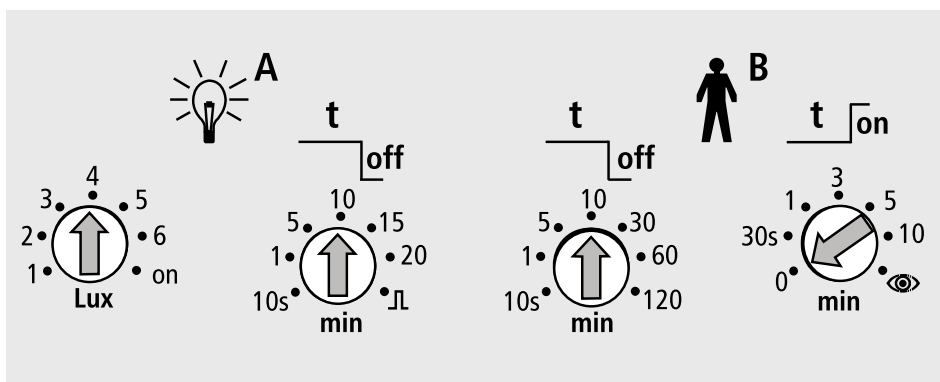


Illustration 6.13: Schéma de réglage en combinaison avec un capteur de présence-lumière du jour. (Source: HTS Theben)

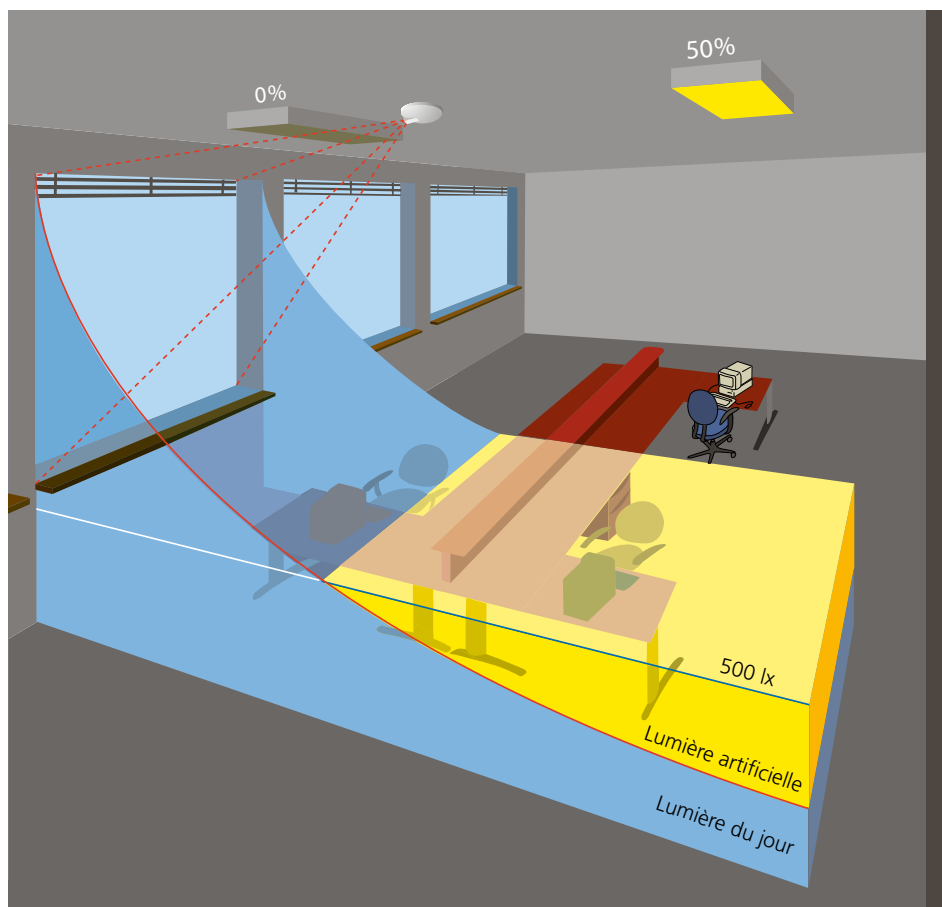


Illustration 6.15: Représentation schématique d'un système de régulation constante de la lumière. (Source: Zumtobel)

Type de capteur	Avantage	Inconvénient
Capteur de local	Mesure de la part de lumière du jour et de la lumière artificielle dans le local concerné et réglage de la lumière artificielle.	Pas de combinaison avec une commande de stores, positionnement des capteurs exigeant, en cas de modification de l'aménagement, nécessité de repositionner, au moins un capteur nécessaire par local.
Capteur de fenêtre	Mesure la lumière du jour indépendamment de l'aménagement de la pièce. Positionnement des capteurs relativement simple.	Pas de combinaison avec une commande de stores, au moins un capteur nécessaire par local.
Capteur de façade	Mesure la lumière du jour effective, bonne combinaison avec une commande de stores, peu de capteurs nécessaires.	Uniquement commande et pas de réglage, nécessité de programmation complexe de chaque local du bâtiment.
Capteur de toiture	Mesure l'état du ciel et différence lumière directe et lumière diffuse. Bonne combinaison possible avec une commande de stores, un seul capteur nécessaire.	Pas de réglage, mais commande, nécessité de programmation complexe de chaque local du bâtiment.

Tableau 6.2: Avantages et inconvénients des différentes positions des capteurs de lumière du jour.

6.5 Efficacité et autoconsommation électrique

Sans aucun doute, un système de gestion de l'éclairage (LMS) peut apporter une importante contribution à l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Selon le site, le bâtiment et son utilisation, 30 à 80 % d'électricité peuvent être économisés par rapport à un éclairage ne bénéficiant pas d'un dispositif de réglage. Toutefois, de nombreux composants ayant une autoconsommation en énergie sont également nécessaires pour un large système de gestion de l'éclairage. Ce type de système fonctionne en permanence, cette autoconsommation peut donc être considérable en fonction des composants utilisés et compenser une partie des économies d'énergie.

Exemple d'un système de gestion de l'éclairage

Dans une école d'une surface de 5000 m², au total 1500 luminaires sont installés avec une puissance moyenne de 40 watts. Il existe trois variantes pour la discussion:

1. L'école ne possède pas de système de gestion de l'éclairage. Conformément à la norme SIA 387/4, le nombre d'heures à pleine charge attendues par an pour l'éclairage est de 1500 h/a.

2. L'école possède un système de gestion de l'éclairage. Des ballasts DALI électroniques graduables sont utilisés avec 200 détecteurs de présence et de lumière du jour. Les capteurs et les ballasts sont regroupés dans douze dispositifs de commande et ces derniers sont reliés à un PC via Internet pour le contrôle et la commande. Conformément à la norme SIA 387/4, une réduction de 30 % du nombre d'heures est attendue.

3. L'école possède un système de gestion de l'éclairage correspondant à la possibilité n°2, mais les meilleurs composants sont utilisés avec la plus faible autoconsommation énergétique.

Le modèle montre de manière impressionnante que l'autoconsommation des composants nécessaires au système de gestion de l'éclairage – et ils sont nombreux – est décisive pour réaliser des économies d'énergie. Si seuls des composants de qua-

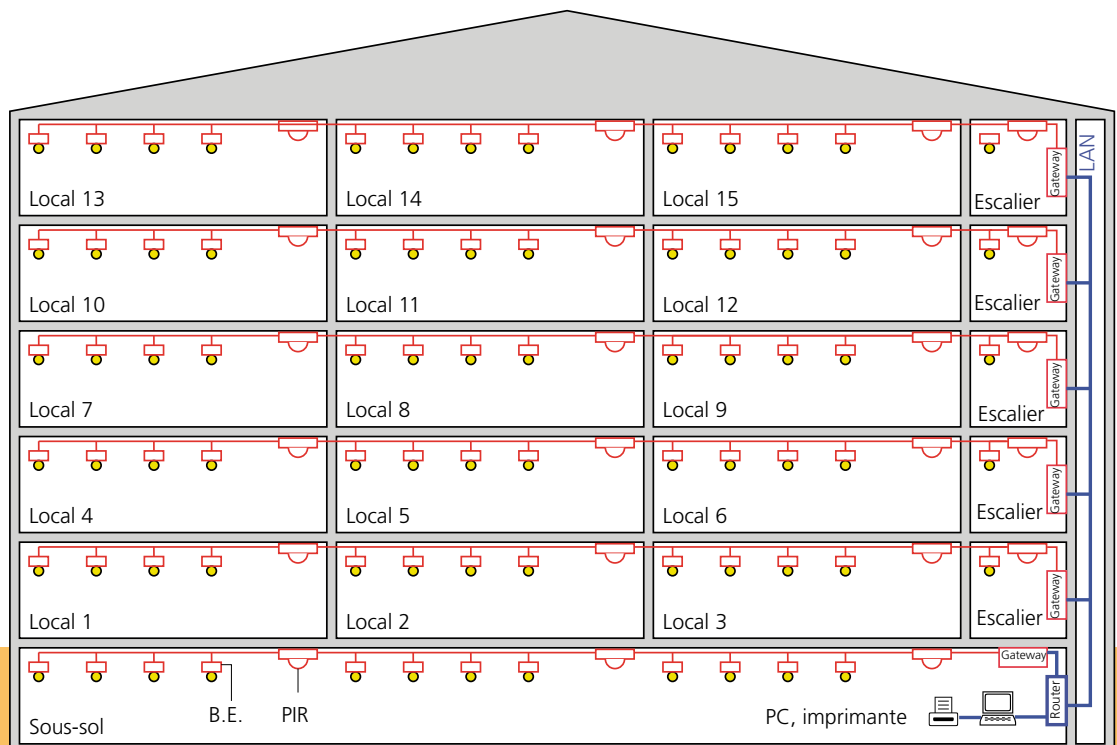


Illustration 6.16:
Composants de la
gestion de la
lumière.

lité moyenne sont utilisés, l'économie attendue sera de zéro. Mais même avec les meilleurs composants, l'autoconsommation des composants annule au minimum 15 % de l'économie attendue (Tableau 6.3).

La problématique décrite se transpose également à d'autres installations techniques qui sont contrôlées et commandées via un système d'automatisation de bâtiment. Les fabricants marginalisent la plupart du temps l'autoconsommation. Avec l'état actuel de la technique, une simple régulation lumineuse sans enregistrement central devrait fournir des résultats nettement meilleurs en matière d'efficacité énergétique que les systèmes complexes d'automatisation de bâtiments.

6.6 Projet de mesure des luminaires à capteurs intégrés

Les principales économies, réalisées grâce à l'utilisation de lampes LED à détecteur, ont été démontrées de manière impressionnante par un projet de mesure réalisé par le Service des constructions de la Ville de Zurich. Le parking du quartier Heuried mesure 7360 m² sur 6 étages et contient environ 360 place de parc. Il est éclairé par des tubes fluorescents; les détecteurs de présence se déclenchent environ 15 minutes après le départ d'une personne ou d'une voiture. Les mesures de l'ancien éclairage ont donné une consommation électrique de 13,2 kWh/m²; cette valeur est clairement au-dessus de la valeur limite de la norme SIA 387/4, qui est de 2,2 kWh/m². Lors d'un projet pilote en 2018, un des six étages du parking a été équipé de luminaires LED avec capteur (type RS Pro 5100 de Steinel). Les luminaires ont été divisés en quatre groupes, chaque deuxième luminaire avait un capteur intégré. En l'absence de personne ou de voiture, l'éclairage était diminué à 10 % après 1 minute,

	Système de gestion de la lumière (LMS)		
	Variante 1: sans LMS	Variante 2: LMS standard	Variante 3: LMS optimal
Surface éclairée	5000 m ²	5000 m ²	5000 m ²
Nombre de luminaires	1500	1500	1500
Puissance moyenne par luminaire	40 W	40 W	40 W
Nombre de ballasts DALI	0	1500	1500
Perte par ballast DALI	0 W	1 W	0,2 W
Nombre de capteurs	0	200	200
Puissance absorbée par capteur	0 W	4 W	1 W
Nombre d'appareils de commande	0	12	12
Puissance absorbée par appareil de commande	0 W	15 W	10 W
Puissance absorbée par routeur	0 W	20 W	10 W
Puissance absorbée par PC et imprimantes	0 W	100 W	50 W
Puissance totale de tous les luminaires	60,0 kW	60,0 kW	60,0 kW
Puissance totale des LMS	0,0 kW	2,6 kW	0,7 kW
Heures à pleine charge des luminaires	1500 h/a	1050 h/a	1050 h/a
Heures à pleine charge des LMS		8760 h/a	8760 h/a
Consommation d'énergie éclairage	90 000 kWh/a	85 776 kWh/a	68 957 kWh/a
Indice de dépense d'énergie éclairage	18,0 kWh/m ²	17,2 kWh/m ²	13,8 kWh/m ²
Economie d'énergie prévue avec LMS		-30 %	-30 %
Economie d'énergie effective avec LMS		-5 %	-25 %

Tableau 6.3: Comparaison des variantes et de leurs effets sur la consommation d'énergie.

puis totalement déclenché après 15 minutes – seule exception: 2 luminaires à l'entrée, maintenus à 50 %. La mesure du nouvel éclairage après un mois d'utilisation a montré une économie d'énergie de 92 %. Le besoin en électricité spécifique atteignait encore 1,1 kWh/m² (Illustration 6.17).

Un aspect important de cette rénovation: La répartition de la lumière et l'éclairage mesuré du nouvel éclairage sont nettement meilleurs qu'avec l'ancien éclairage, voir les illustrations 6.19 et 6.20.

A la suite de l'enquête, la ville de Zurich est en train de convertir l'ensemble du parking à la nouvelle technologie. Une écono-

mie d'énergie annuelle de 92 MWh/a pu être réalisée, ce qui correspond à environ CHF 14 000 de frais d'énergie économisés.

Commentaires de l'illustration 6.18

La plage bleue représente une variation quotidienne type de l'ancien éclairage: avec une puissance maximale de 3,21 kW et un nombre d'heures à charge pleine de 5318 h/a, la consommation en énergie se situe à 17,1 MWh/a (un des 6 étages du parking). La charge en ruban (standby = en fonction sans utilisation) se monte à 400 watts. La courbe rouge est la mesure d'une variation quotidienne type du nouvel éclairage avec des luminaires LED avec

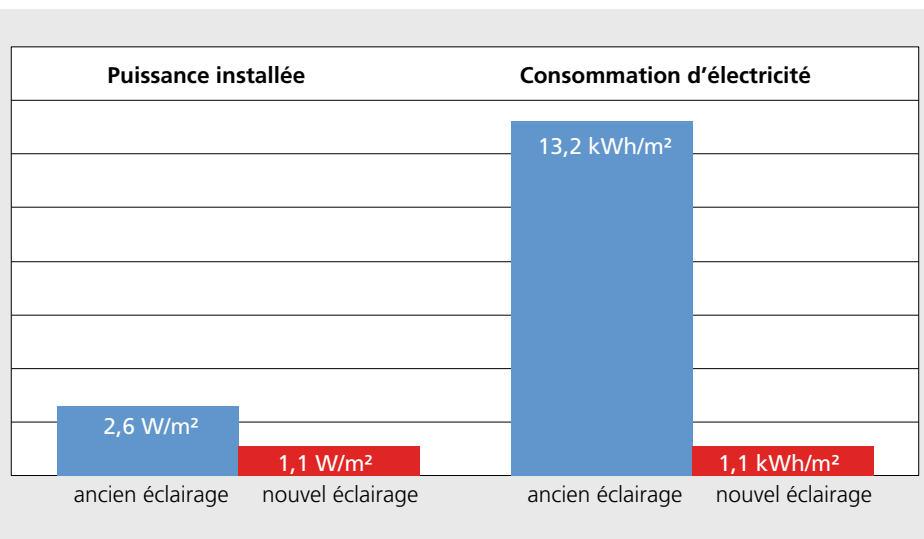


Illustration 6.17: Réduction de la puissance de 58 % et de l'énergie de 92 %.

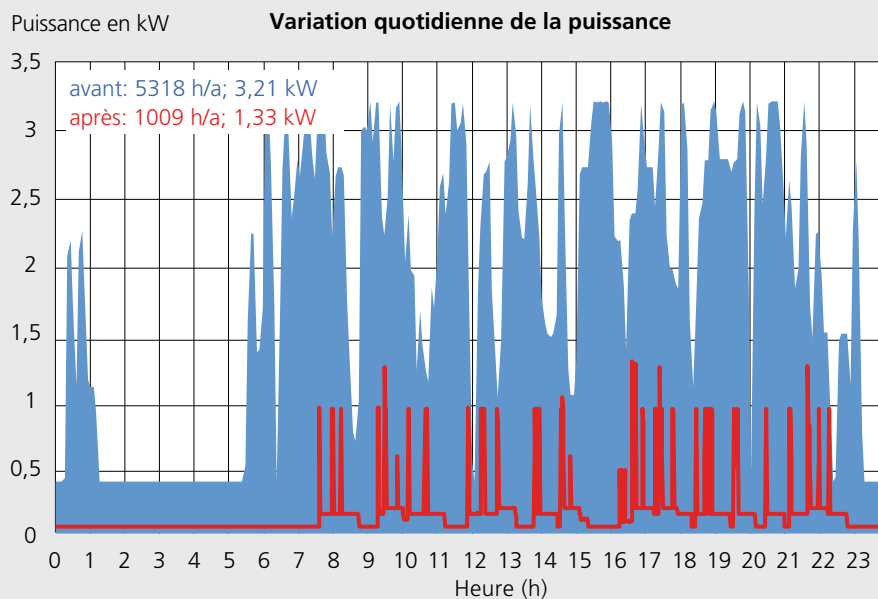


Illustration 6.18: La variation quotidienne mesurée de la puissance avant et après la rénovation.

capteur. Après seulement une minute d'absence de personnes ou de véhicules, les différents groupes de luminaires se remettent au niveau d'éclairage de base. Le Standby consomme encore 30 watts. Avec un maximum de 1,33 kW et 1009 heures à pleine charge, l'économie d'énergie se mesure alors à 1,34 MWh/a.

Les économies totales s'élèvent à 92 %, dont 53 points de pourcentage sont attribuables aux capteurs et 39 points à l'amélioration du rendement des luminaires.

Les mesures ont été conduites pendant un mois entier, les journées, prises individuellement, ne diffèrent pas de manière significative.

La comparaison des chiffres clés avec les exigences SIA et Minergie, avant et après la rénovation, est présentée dans le tableau 6.4.



*Illustration 6.19:
L'éclairage et le niveau d'éclairage mesurés avant la rénovation.*



*Illustration 6.20:
L'éclairage et le niveau d'éclairage mesurés après la rénovation.*

Commentaires sur le tableau 6.4

L'ancien éclairage correspond à ce qui se faisait de mieux, avant l'existence des LED: les meilleures lampes fluorescentes, des ballasts électroniques et des détecteurs de mouvements. Néanmoins, avec une valeur de projet de 13,9 kWh/m², même la valeur limite SIA (10,2 kWh/m²) n'était pas atteinte. En effet, en cas d'utilisation de lampes fluorescentes, les capteurs n'ont guère d'effet en raison des longs délais d'extinction.

Le nouvel éclairage est installé de manière efficiente et dispose d'un système de capteurs qui profite de la nouvelle technologie LED. Par conséquent, les heures à pleine charge diminuent encore plus que la puissance installée. L'exigence Minergie (1,5 kWh/m²) est clairement respectée avec un projet mesuré à 1,1 kWh/m²; il manque encore un petit saut jusqu'à la valeur cible.

6.7 Eclairage des couloirs avec des LED (projet pilote)

L'immeuble Werd de la ville de Zurich a été totalement assaini en 2005. Une attention particulière a été portée à la durabilité et l'efficacité énergétique (aussi pour l'éclairage) lors de la rénovation. Ainsi, on a utilisé les premiers luminaires sur pied Minergie, qui avaient été conçus pour ce bâtiment et qui consommaient deux fois moins d'électricité que les luminaires sur pied courants de l'époque. L'éclairage des couloirs a également été réalisé avec les dernières techniques de l'époque. Le concept architectural a exigé des rails lumineux continus (Illustration 6.21) qui ont été équipés de tubes fluorescents les plus efficaces (35 W, type T5). Les rails fournissant plus en pleine charge que les 100 lux d'éclairage lumineux exigés, une gradation constante des ballasts a été paramétrée sur environ 60 % de flux lumineux. Au moyen des détecteurs de mouvement, une déconnexion automatique (après 10 minutes) de l'éclairage des couloirs en l'absence de présence a été installée.

Des mesures ont montré plus tard que la fréquence de passage des personnes dans les couloirs était si élevée que les détecteurs de mouvement ne se déconnectaient presque jamais avec le délai de déconnexion de 10 minutes et que la réduction espérée des durées de fonctionnement de cet éclairage avec plus de 3000 heures par

*Tableau 6.4:
Comparaison des
chiffres clés avant et
après la rénovation
selon les exigences
de la SIA et de
Minergie.*

	Mesures avant la rénovation (mai 2015)	Mesures après la rénovation (février 2018)
Puissance installée		
Valeur du projet	2,6 W/m ²	1,1 W/m ²
Valeur limite SIA	3,6 W/m ²	1,4 W/m ²
Valeur cible SIA	2,3 W/m ²	0,9 W/m ²
Heures à pleine charge		
Valeur du projet	5318 h/a	1009 h/a
Valeur limite SIA	2835 h/a	1600 h/a
Valeur cible SIA	1740 h/a	800 h/a
Consommation d'électricité		
Valeur du projet	13,9 kWh/m ²	1,1 kWh/m ²
Valeur limite SIA	10,2 kWh/m ²	2,2 kWh/m ²
Valeur cible SIA	4 kWh/m ²	0,7 kWh/m ²
Exigences Minergie	7,1 kWh/m ²	1,5 kWh/m ²

an n'a de loin pas été atteinte. Dans l'impossibilité de commuter plus brièvement les lampes fluorescentes en raison de leur temps d'amorçage de plusieurs minutes, il n'était pas possible d'optimiser le réglage de l'éclairage dans les couloirs.

Avec l'arrivée de la technologie LED, une nouvelle technologie d'éclairage est désormais disponible: elle peut être réglée beaucoup plus rapidement et ne présente pas de perte à la gradation, contrairement à la gradation des lampes fluorescentes. Avec un projet pilote mené dans un couloir du centre administratif Werd, l'Office cantonal de l'industrie des bâtiments voulait tester la quantité d'énergie économisée en remplaçant 30 m de chemins lumineux par des LED et la réduction simultanée des délais avec les détecteurs de mouvement.

Mesures

Deux couloirs identiques (30 sur 2,4 m) ont été mesurés pendant plusieurs semaines avec un dispositif de mesure d'énergie et de puissance chacun (Illustration 6.22). Dans les deux couloirs, les éclairagements lumineux et les répartitions lumi-

neuses étaient les mêmes. Les deux éclairages étaient à peine différenciables:

- Couloir 1 avec lampes fluorescentes et détecteurs de présence avec intervalle de 10 minutes

- Couloir 2 avec ligne lumineuse LED et détecteurs de présence avec intervalle de 1 minute.

Le résultat est impressionnant. L'éclairage LED économise plus de 80 % de l'énergie électrique en comparaison avec la technologie des lampes fluorescentes utilisée jusqu'ici.

Illustration 6.22:
Appareil de mesure de l'énergie et de la puissance avec enregistreur de données pour carte SD.



Illustration 6.21:
Vue intérieure du centre administratif Werd.

■ D'un côté, la puissance électrique est réduite, parce que les LED, contrairement aux lampes fluorescentes, ne présentent pas de pertes à la gradation, dans le cas présent de 5,9 W/m² (lampes fluorescentes) à 2,6 W/m² (LED).

■ D'un autre côté, les durées de fonctionnement quotidiennes diminuent en raison des durées de commutation plus courtes, d'en moyenne 13,2 h/j pour l'éclairage avec des lampes fluorescentes à 5,7 h/j pour les LED. Tandis que les lampes fluorescentes ne s'allument et ne s'éteignent que 4 fois par jour via le détecteur de mouvement, ce sont plus de 100 fois pour l'éclairage LED.

■ Il en découle une réduction de l'indice d'énergie de l'éclairage pour le couloir de 19,5 à 3,6 kWh/m², ce qui correspond à une économie d'énergie effective de 81 % (Illustrations 6.23 et 6.24). La question s'était posée de savoir si l'allumage et l'extinction fréquents étaient gênants pour le personnel. Aucune enquête systématique n'a certes été menée à ce sujet, mais aucune plainte n'a été enregistrée. À l'évidence, les employés n'ont remarqué aucun changement. À titre d'essai, s'est ajoutée à cela une étape supplémentaire dans l'éclairage LED, pour laquelle la lumière ne s'éteint pas entièrement, mais reste sur 15 % de flux lumineux. Avec cette lumière

Illustration 6.23:
Courbe journalière
de la puissance lors
d'une journée de
travail usuelle; le
couloir à LED
consomme 81 %
d'énergie de moins
que le couloir avec
lampes fluores-
centes.

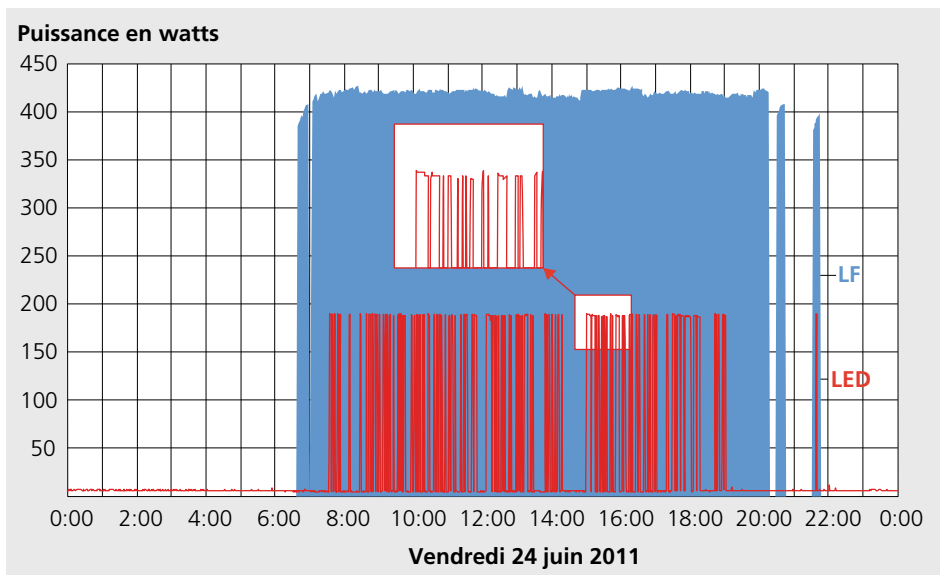
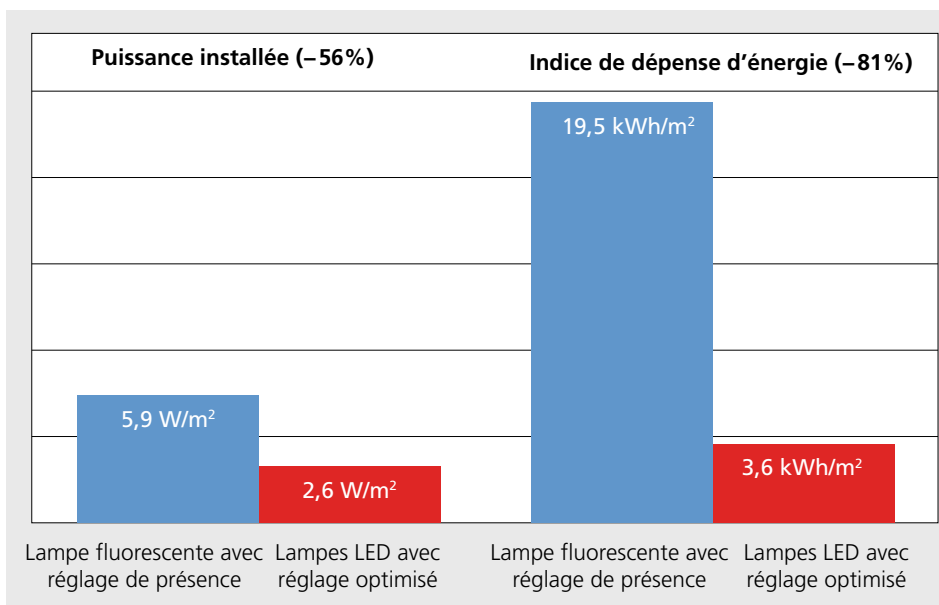


Illustration 6.24:
56 % d'économie de
la puissance instal-
lée et 81 % d'éco-
nomie de la
consommation
d'énergie.



de confort qui réduit fortement l'effet de la commutation fréquente, l'économie diminue, mais seulement légèrement: l'économie globale baisse de 81 à 77 %.

Bilan énergétique et rentabilité

Une estimation effectuée sur un an donne une réduction de l'indicateur d'énergie éclairage de 19,5 kWh/m² (valeur limite SIA: 19,0 kWh/m²) avec l'ancien éclairage aux lampes fluorescentes à 3,8 kWh/m² (valeur cible SIA: 7,5 kWh/m²) avec les luminaires LED.

Il en résulte une économie annuelle d'électricité de 15,7 kWh/m² ou 3.10 CHF/m², ce qui correspond à 7.50 CHF/an par mètre linéaire de couloir. Comme les luminaires LED n'ont pas besoin de lampes de rechange pendant toute leur durée d'utilisation (15 ans), les frais d'entretien diminuent également d'environ le montant de l'économie des dépenses d'énergie, d'après ce qui a été constaté. Pour un investissement supplémentaire de CHF 100 par mètre linéaire de lumière LED dans le couloir par exemple, il en résultera donc une durée d'amortissement de l'éclairage LED de six bonnes années.

Conclusion

Ce résultat montre bien que la technologie LED présente, avec le réglage lumineux correspondant, un très important potentiel d'économies par rapport aux éclairages de couloir courants, considérés comme efficaces sur le plan énergétique. Par ailleurs, il faut noter que les réglages lumineux des installations d'éclairage courantes apportent la plupart du temps bien moins d'économies d'énergie que ce qui est supposé. L'utilisation des LED présente

également des avantages de conception: Les «taches sombres» non appréciées, comme celles qui se trouvent entre les lampes fluorescentes, n'existent pas avec les lampes LED (Illustration 6.25).

Tableau 6.5:
Bilan énergétique
LED versus LF.

	Lampes LED	Lampes fluorescentes compactes
Puissance de fonctionnement max.	187 W	420 W
Heures de fonctionnement	1463 h/a	3343 h/a
Consommation d'énergie	274 kWh/a	1404 kWh/a
Indice de dépense d'énergie	3,8 kWh/m ²	19,5 kWh/m ²
	0.80 CHF/m ² a	3.90 CHF/m ² a
Valeur limite SIA 380/4		19,0 kWh/m ²
Valeur cible SIA 380/4		7,5 kWh/m ²
Exigence Minergie		10,5 kWh/m ²

Illustration 6.25:
Transition d'un luminaire à l'autre: à gauche, lampe fluorescente; à droite, LED (luminaires: Slot de Zumtobel).



Conception et optimisation

7.1 Bases de la planification d'éclairage

L'espace intérieur n'est pas le même partout. Pour définir l'éclairage pour des espaces intérieurs, il est nécessaire d'en connaître l'utilisation et l'utilisateur, de définir exactement la tâche visuelle et de connaître le concept de matériaux avec la composition des surfaces, le concept des couleurs, le facteur de brillance, etc. Les dimensions de la pièce doivent aussi être connues et les références de l'espace intérieur se retrouvent à leur tour dans le concept d'éclairage.

Les exigences dans l'habitat privé sont fondamentalement différentes de celles des standards industriels: dans l'habitat privé, il n'existe aucune norme, dans le domaine professionnel, tout est considérablement réglementé.

La lumière donne corps aux objets et met en relation l'espace, la forme, la couleur et la surface et les rend perceptibles. Ce faisant, la lumière elle-même n'a pas de propriétés objectives. Elle devient seulement visible par le «contact» avec la surface d'un objet et donc perceptible également. Elle devient matériau optique en se reflétant sur les surfaces.

La lumière détermine notre perception du temps et nous permet de connaître le rythme des jours et le changement des saisons. La lumière permet également de transformer la nuit en jour. La lumière artificielle nous rend indépendants de la lumière du jour.

La lumière permet de modifier les espaces sans les changer physiquement. La lumière peut agrandir ou raccourcir les espaces, créer des relations ou délimiter des zones et donner des couleurs aux surfaces. Plus encore: la lumière dirige le regard, commande notre perception et influence notre attention. La lumière crée ainsi des hiérarchies de perception. La lumière peut également éveiller des souvenirs, créer des associations et dégager des ambiances.

Les aspects culturels nous démontrent que la lumière n'est pas maniable de manière homogène, mais qu'elle dépend du lieu et du temps. L'ombre ou l'obscurité ou la zone d'ombre qui est volontairement utilisée pour donner un caractère propre à des locaux ou à des zones spéciales dans l'espace possède une valeur extrêmement importante.

S'il est possible de calculer et de mesurer les propriétés physiques d'une situation d'éclairage, le processus visuel extrêmement complexe et la perception subjective décident en dernier lieu du succès d'un concept d'éclairage. Pour cette raison, la planification de l'éclairage ne peut pas se limiter seulement à la conception technique, mais doit inclure dans la réflexion la perception et ses aspects psychologiques. La tâche consiste alors à exécuter de manière conceptuelle et thématique la planification de l'éclairage comme élément intégral d'un projet architectural global, de manière à obtenir un environnement visuel qui prend en compte les besoins et les activités des personnes, favorise leur bien-être et aborde l'architecture de sorte que l'effet lumineux souhaité, et donc l'effet spatial qui va de pair, puisse se déployer. Le critère principal pour une planification de l'éclairage orientée vers la perception ne peut pas être l'indicateur d'un instrument de mesure, mais plutôt l'art et la manière d'une personne de satisfaire aux exigences visuelles. La vision est un processus de traitement des informations. Ainsi, un contenu est attribué à l'environnement visuel, qui semble être plus que la simple utilisation des surfaces à effets optiques. Le «spectateur» n'est donc plus le récepteur passif, mais un facteur actif dans le processus de perception qui construit les images de son environnement visuel sur la base d'un grand nombre d'attentes, d'expériences et de besoins. Sur des considérations de durabilité, il est en outre évident que l'efficacité d'un éclairage ne se situe pas dans la lampe ou dans le luminaire ou

dans l'espace, mais dans l'ensemble du système Lampe (encore mieux la lampe et le ballast), Luminaire (réflecteurs, système optique, gestion thermique) et Espace (type de construction, dimensions du local et composition de la surface, degré de réflexion et de brillance). Cette expérience a généré une nouvelle compréhension de la succession de l'étiquette-énergie en faveur du label Minergie pour les luminaires, étant entendu que le fonctionnement de l'ensemble du système n'est pas garanti. Des outils de calcul modernes comme Relux ou Dialux se réfèrent toute-

fois aux facteurs des locaux ainsi qu'aux données fiables sur les luminaires. Dans ce contexte, la fiabilité des données de base a beaucoup à voir avec la prévision de la qualité et de la quantité de lumière.

Les étapes de travail concernant la composition lumineuse et sa représentation doivent trouver leur place dans celles accordées aux analyses des besoins, de la valeur d'usage, de la rentabilité ainsi qu'à l'analyse énergétique s'approchant de la prise de décision. L'image, un «mood board», des visualisations réalistes de la technologie lumineuse, des visualisations

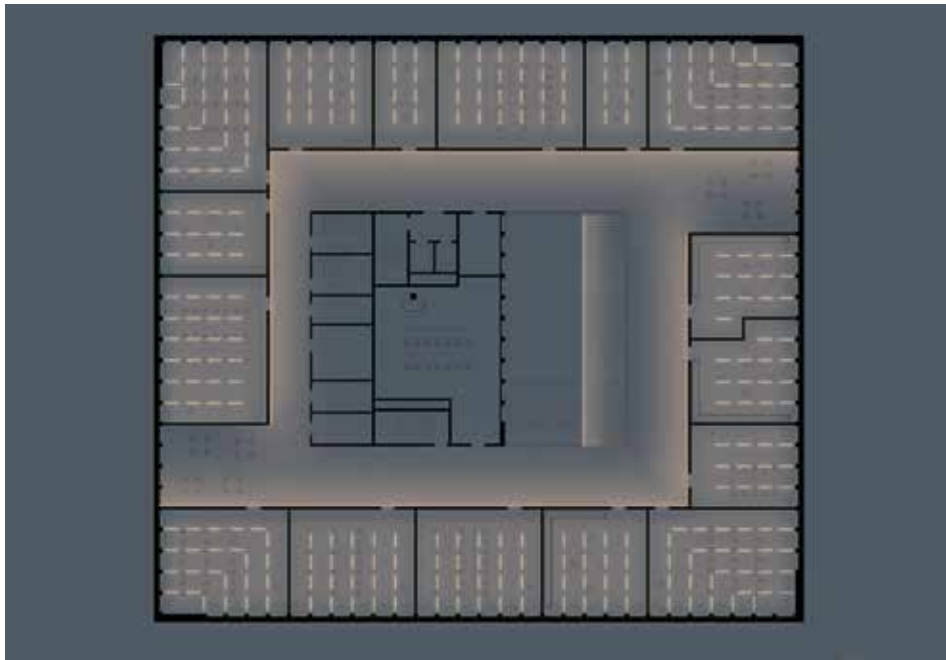


Illustration 7.1: Plan gris avec illustration de l'éclairage.

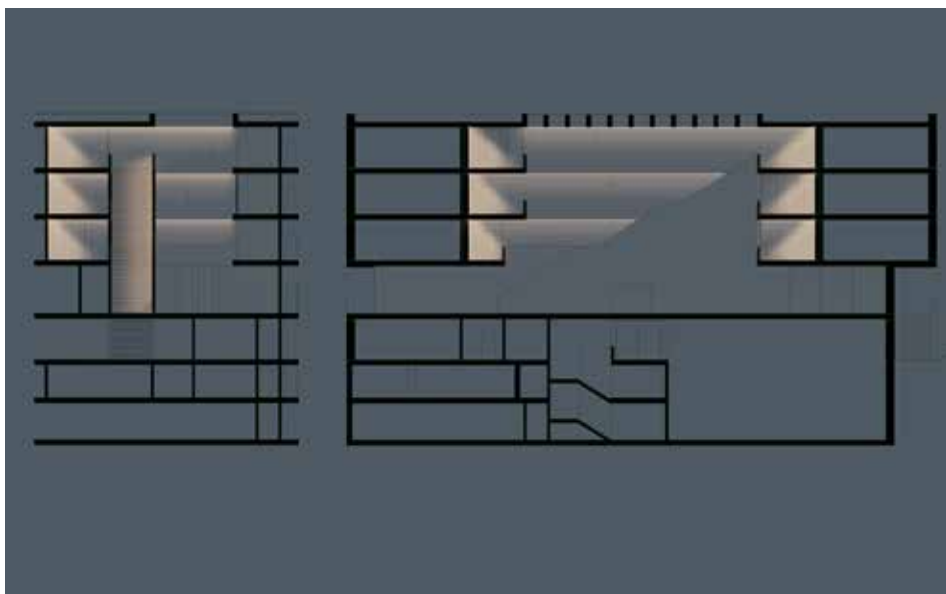


Illustration 7.2: Représentation en coupe de l'éclairage.

spatiales jusqu'à la représentation 3D, mais également de simples plans de gris et des plans d'éclairage, peut être le bon média pour rendre accessible un projet au mandant, de la manière la plus compréhensible possible.

Le déroulement des phases s'articule alors autour du règlement SIA 108, règlement concernant les prestations et les honoraires des ingénieurs électriciens où les phases d'avant-projet et de projet de construction sont nettement sous-évaluées. Pour finaliser un projet, des performances sensiblement élevées sont demandées dans ces deux premières phases. La lumière artificielle peut être conçue et commandée de manière très précise. L'uniformité, le facteur d'ombrage, la modulation, le facteur forme, les règles de conception, la qualité et l'anti-éblouissement des luminaires peuvent être utilisés et calculés le plus précisément possible.

7.2 Exemples d'optimisation

L'objet est un bâtiment industriel dont le caractère doit être renforcé par le choix des matériaux et la hauteur du local (4,25 m). Le béton brut doit être laissé tel quel et un mur intérieur doit être peint en rouge sombre. La protection solaire est normale et les fenêtres sont de la hauteur du local. Le bâtiment dans son ensemble (nous considérons seulement une partie pour le bureau dans l'exemple) doit être réalisé selon les critères Minergie-P. Les installations doivent rester simples malgré tout, l'éclairage lumineux doit être conçu dans les normes, les luminaires doivent si possible porter le label Minergie, des luminaires à rayonnement indirect doivent être utilisés pour l'accentuation du volume. La répartition lumineuse dans la pièce peut être calculée et quantifiée au moyen d'un programme de calcul de l'éclairage.

Une première évaluation de la zone de bureau est rebutante et les valeurs limites peuvent à peine être respectées. Le potentiel est là, mais qui va faire le premier pas? L'architecte qui a créé le concept de lumière du jour et le concept des couleurs?

Illustration 7.3: Plan d'ensemble du bureau avec zone de circulation.

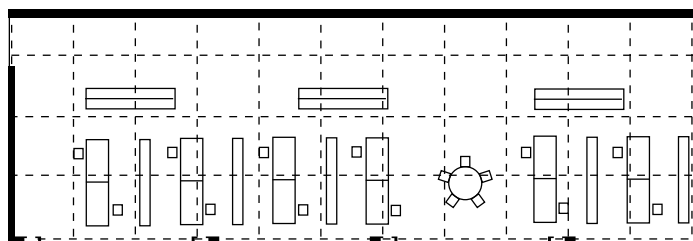


Illustration 7.4: Disposition des corps d'éclairage (attention: zone d'éblouissement par réflexion dans le domaine de l'«éclairage au-dessus de la tête»!).

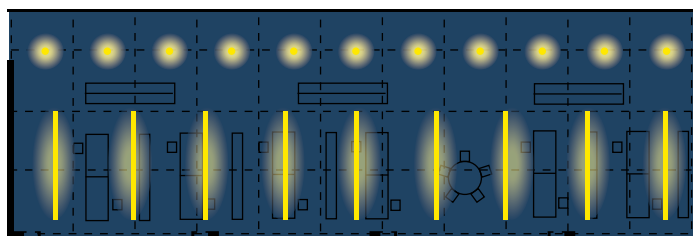
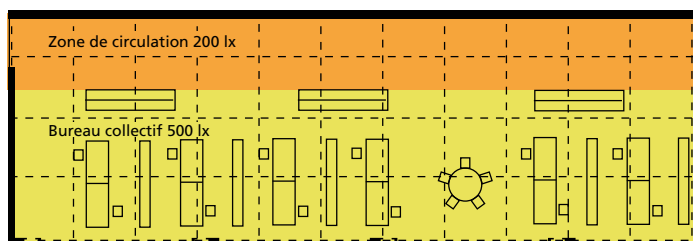


Illustration 7.5: Attribution des zones selon la norme SIA 2024 (42 utilisations standard).



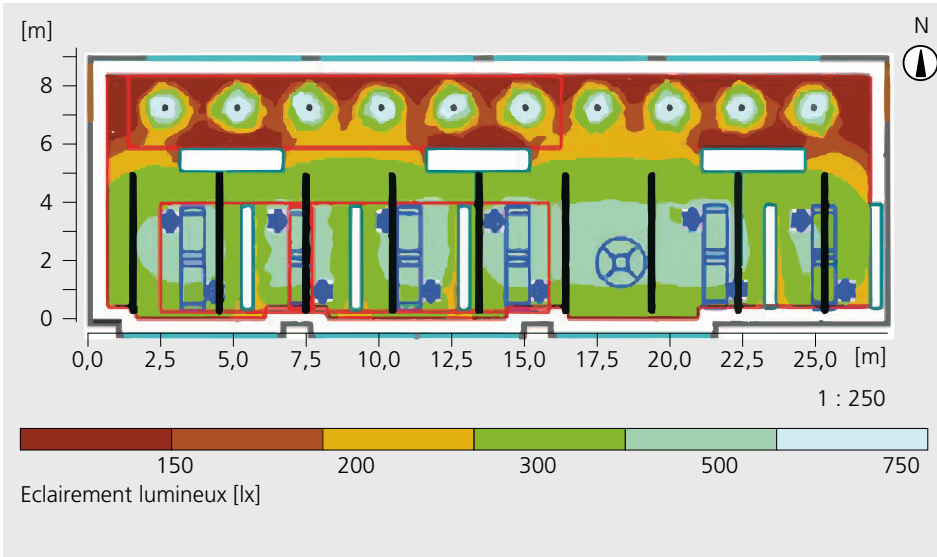


Illustration 7.6: Représentation des pseudo-couleurs du calcul d'éclairage avec gamme d'éclairage lumineux.

Illustration 7.7: Luminaire suspendu (à gauche) et spot pour zone de circulation (à droite); les luminaires avec la label Minergie peuvent être directement téléchargés sur le site toplicht.ch.

Illustration 7.8: Tentative infructueuse d'atteindre Minergie.

MINERGIE®
Leuchten
Luminaires

MINERGIE® -Leuchte
Reg.-Nr. Zu-0049-d
Reg.-Datum 11.07.2008

Claris 2 Pendelleuchte 2x49W MC ID dimmbar

Pendelleuchte Direktindirekt mit Comfort-Raster 2 x 49W, für T16, Tochterleuchte für DALI-Ansteuerung mit digital dimmbarem elektronischem Vorschaltgerät, Gehäuse aus kantigem abgestuften Aluminium-Strangpressprofil, Abmessungen 150mm x 150mm x 50mm, Profilleuchtehöhe 34mm, Umlaufender symmetrischer Rahmen Breite 40mm, auf Gehängung geschliffen, Titan pulverbeschichtet, Lichtlenkung mit Zellenraster-Technologie, einzelne Rastermodule aus hochwertigem Verbundwerkstoff gleichmäßig vakuumbedampft mit Reinstatuminium, mit Schutzschicht aus SiO₂, Indirektleuchte Abstrahlcharakteristik (4-36) mit beidseitiger, besser Lichtverteilung, Blende in abgestufter Gehäuseform LxBxH 100 x 70 x 32, Gewicht: 4,7 kg www.zumtobel.ch/42158824

Leuchtenkategorie	Pendelleuchte
Lampenkategorie	Leuchtstofföhren
Artikelnummer	42158824
Eigenschaften_Vorschaltgerät	EVG digital Tridronic onedial
Vorgewinkelte Messlampe	T16/49
Anzahl Lampen pro Leuchte	2
Gemessene Leistung	110 W
Gesamtlumenstrom 25° (Lumen)	8600
Standby-Leistung	0,5 W
Integrierte Lichtregelung	Dimmung
Leuchtenbetriebswirkungsgrad	89 %
Anteil Direktlicht	37 %
Abstrahlung	direkt-indirekt strahlend
Blendklasse UGR im Standardraum	<16 (e16) (Blickplatz)
Max. Leuchtdichte über 65°	max. 978 cd/m ²
Leuchtdichtebauweise (Anforderung)	89 lm/W (85 lm/W)
Original- oder abgeleitete Messung	Abgeleitet
Messdatum_Messreferenz	
EULUMDAT-Dateli	D24728UA.ltr
Messort	METAS, Bern-Webern

Parscan Strahler
für Halogen-Metalldampf Lampen

72 136.000 Weiß (RAL9002)
HIT-CE 120V (12 33000m)
EVG
Spotreflektor

Produktbeschreibung
Gehäuse: zerlegbar gelblich-Aluminium, pulverbeschichtet, zum Lampeneinsatz drehbar 0°-90° schwenkbar 3-achsrig. In der Zirkel eingeregelter Ausleger Aluminiumguss, pulverbeschichtet, ein 3-Phasen-Adapter 300° drehbar. Eine Schraube zum Fixieren der Decke, und ein 4-achsriges, nicht-regulierbares, einreguliert, Leuchtgehäuse.
ERCO 3-Phasen-Adapter: Kunststoff.
Schutzglas: Beschützung: Aluminiumguss, schwarz pulverbeschichtet, Aufhänger für Zubehör.
Spotreflektor: Aluminium, überlackiert, hochglänzend.
Gewicht: 3,00kg

Hm [m]	ESd [Dm]	θ°
1	33270	0,16
2	6318	0,31
3	3660	0,47
4	2579	0,61
5	1331	0,79

HIT-CE 35W (12 33000m)
4000D-03

Montage:
ERCO 3-Phasen-Stromschleife
Hilfs-3-Phasen-Stromschleife
Mangelpol-3-Phasen-Stromschleife
L-Phasen-Perleuchte

Valeur limite	25,7 kWh/m ²	
Valeur Minergie	14,0 kWh/m ²	
Valeur du projet	26,3 kWh/m ²	
	Bureau	Circulation
Eclairage lumineux	460/530 lx	290 lx
Luminaire	2/49 W (106 W)	Erco Parscan 1/35 W (45 W)
Détecteur de présence	non	non
Régulation de la lumière du jour	non	non
Réflexions de la pièce	sombre	sombre
Système de stores	Stores en tissu	—

SIA-380/4-Tool Beleuchtung

Objekt		Zusammenfassung																																				
Projekt	Waha AG Industriestrasse 9 8050 Zürich	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Flächen</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Vorprojekt</th> <th>Projekt</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nettofläche</td> <td></td> <td>250 m²</td> </tr> <tr> <td>Energiebezugsfläche (EBF)</td> <td></td> <td>290 m²</td> </tr> <tr> <td>Faktor Nettofläche zu EBF</td> <td></td> <td>0,91</td> </tr> </tbody> </table>		Flächen			Vorprojekt	Projekt	Nettofläche		250 m ²	Energiebezugsfläche (EBF)		290 m ²	Faktor Nettofläche zu EBF		0,91																					
Flächen																																						
	Vorprojekt	Projekt																																				
Nettofläche		250 m ²																																				
Energiebezugsfläche (EBF)		290 m ²																																				
Faktor Nettofläche zu EBF		0,91																																				
Projekt-Typ	Neubau	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Systemanforderungen</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Projektwert</th> <th>Grenzwert</th> <th>MINERGIE</th> <th>Zielwert</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Vorprojekt</td> <td>kWh/m²</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>MWh</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Projekt</td> <td>kWh/m²</td> <td>26,3</td> <td>25,7</td> <td>14,0</td> <td>10,1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>MWh</td> <td>86,0</td> <td>84,1</td> <td>45,8</td> <td>33,0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>MWh</td> <td>6,7</td> <td>6,5</td> <td>3,6</td> <td>2,6</td> </tr> </tbody> </table>		Systemanforderungen			Projektwert	Grenzwert	MINERGIE	Zielwert	Vorprojekt	kWh/m ²					MWh				Projekt	kWh/m ²	26,3	25,7	14,0	10,1		MWh	86,0	84,1	45,8	33,0		MWh	6,7	6,5	3,6	2,6
Systemanforderungen																																						
	Projektwert	Grenzwert	MINERGIE	Zielwert																																		
Vorprojekt	kWh/m ²																																					
	MWh																																					
Projekt	kWh/m ²	26,3	25,7	14,0	10,1																																	
	MWh	86,0	84,1	45,8	33,0																																	
	MWh	6,7	6,5	3,6	2,6																																	
Projektstand	Projekt	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">MINERGIE ECO</th> </tr> <tr> <th>Vorprojekt</th> <th>Projekt</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>54%</td> </tr> </tbody> </table>		MINERGIE ECO		Vorprojekt	Projekt		54%																													
MINERGIE ECO																																						
Vorprojekt	Projekt																																					
	54%																																					
Bauherr	Waha AG	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Definition MINERGIE Beleuchtung</th> </tr> <tr> <th>Grenzwert</th> <th>Zielwert</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3/4</td> <td>1/4</td> </tr> </tbody> </table>		Definition MINERGIE Beleuchtung		Grenzwert	Zielwert	3/4	1/4																													
Definition MINERGIE Beleuchtung																																						
Grenzwert	Zielwert																																					
3/4	1/4																																					
Architekt	Martin Mustermeier architekten Zürich																																					
Elektroplanung	Amstein + Walther AG Zürich																																					
Beleuchtungsplanung	Amstein + Walther AG Zürich																																					
Ersteller Nachweis	Amstein + Walther AG Zürich																																					
Datum	09.11.2008																																					

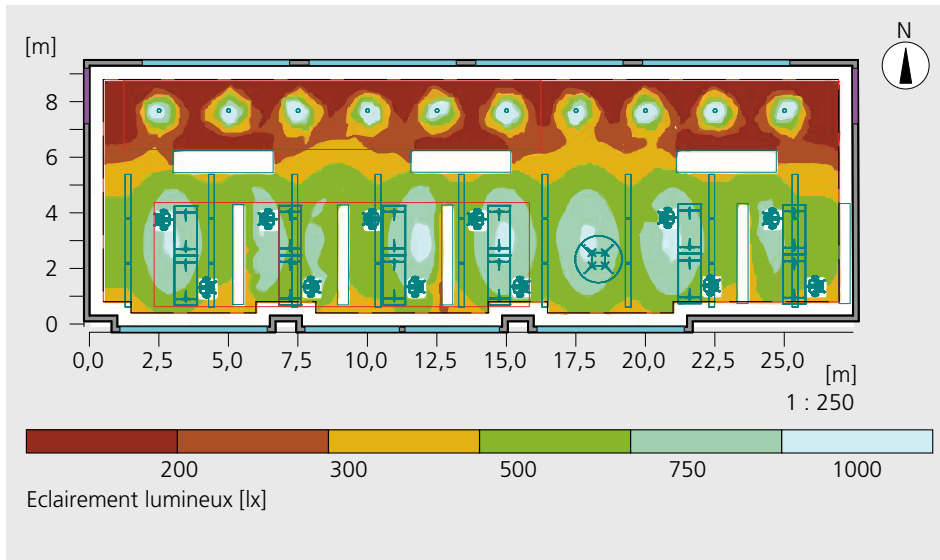


Illustration 7.9: Le nouveau calcul de la répartition lumineuse montre un éclairage lumineux aux places de travail, malgré une puissance plus faible.

Illustration 7.10: Dans le cas présent, le luminaire sur le côté gauche convient mieux grâce à une autre répartition de la lumière que le luminaire à gauche pourrait bien entendu également être certifié selon Minergie.

Arano

TP5642 2xTL5-35W/840 HFO CB-W-SMS ALU
Pendelleuchte mit OLC-Recyclingmaterialien, silber coloriert, Beschleunigungsfaktor (Bf) = indirekt (20%) / strahlend, flache Gehäuse aus Alu-Druckguss (Zinn/Alu), mit regulierbarem DALI-DIMM und TL5-Lampen (2x35W/840) mit Doppel-Selbstheilung und Anstrichschutz.

Prüfungszentrum OLC-Recyclingmaterialien mit 3D-Lamellen aus überbeschichteten Recyclingmaterialien, Rundkopfbündel nach DIN EN 12464-1 (L < 200° oder bei 60°).

Lieferung inklusive Leuchtmittel, Selbstheilung und Anstrichschichtung im Metallgehäuse.
Schutzklasse I, Schutzart IP 20, ENEC GS, F-Zeichen, CE-Zeichen

Technische Daten

Bedienung: 2 x TL5-35W
Lichtflamme: 840
Lichtstrom: 6600 lm
Unterer Halbraum: 70,0%
Beleuchtungsabdeckung: 99,0%
Anschlussleistung: 77,0 W
Vorschaltgerät: HF ballastlos
Maße (L x B x H): 1552 x 206 x 45 mm
Gewicht: 5,5 kg

Lichtstärkeverteilung

Blendungsbegrenzung

Philips Genie
Universalintegrated Lighting - Professional Lighting Solutions
Tel: +49 (0) 180-488 200 | info@philips-genie.com

Philips

MINERGIE® Leuchte
Reg.-Nr. Zu-0049-d
Reg.-Datum 11.07.2008

ZUMTOBEL

Claris 2 Pendelleuchte 2x49W MC ID dimmbar

Pendelleuchte Direkt/indirekt mit Comfort-Raster 2 x 49W, für T16, Tochterleuchte für DALI-Ansteuerung mit digital dimmbarem elektronischem Vorschaltgerät, Gehäuse aus kantigem abgestuften Aluminium-Strangpressprofil, Abmessungen 1500mm x 1500mm x 50mm, Profillochweite 34mm, Umfassender symmetrischer Rahmen Breite=40mm, auf Gehung geschliffen, Titan pulverbeschichtet, Lichtlenkung mit Zellenraster-Technologie, einzelne Rastermodule aus hochwertigem Verbundwerkstoff gleichmäßig rekumbentgedrückt mit Reine aluminium, mit Schutzschicht aus SiO2. Indirekt/direkte Abstrahlcharakteristik (84.36) mit baldförmiger, breiter Lichtverteilung, Baldochin in abgestufter Gehäuseform LxBxH 100 x 70 x 32, Gewicht: 4,7 kg www.zumtobel.ch/42158524

Leuchtkategorie Pendelleuchte
Lampenhersteller Leuchtstofflampen
Antriebsnummer 42158524
Einseitiges Vorschaltgerät EVS digital Tridonic one-4all
Verwendete Messlampe T1649
Anzahl Lampen pro Leuchte 2
Gesamte Leistung 110 W
Gesamtlumenstrom 25° (Lumen) 8600
Standby-Leistung 0,5 W
Integrierte Lichtregelung Dimmung
Leuchtenbetriebswirkungsgrad 89 %
Anteil Direktlicht 37 %
Abstrahlung direkt/indirekt strahlend
Blendklasse UGR im Standardraum <16 / <16 (lang/quadr.)
Max. Leuchtdichte über 60° max. 978 cd/m²
Leuchtdichtebesonde (Anforderung) 69 lm/W (65 lm/W)
Original- oder abgeleitete Messung Abgeleitet
Messdatum, Messgenauer 02/17/2014, 18
EULUMDAT-Datei METAS, Bern/Wabern
Messlabor METAS, Bern/Wabern

Illustration 7.11: La valeur du projet s'est nettement améliorée. Encore insuffisant, mais sur le bon chemin.

Valeur limite	25,7 kWh/m ²	
Valeur Minergie	14,0 kWh/m ²	
Valeur du projet	15,5 kWh/m ²	
	Bureau	Circulation
Eclairage lumineux	460/530 lx	290 lx
Luminaire	2/49 W (106 W)	Erco Parscan 1/35 W (45 W)
Détecteur de présence	oui	non
Régulation de la lumière du jour	oui	non
Réflexions de la pièce	sombre	sombre
Système de stores	Stores en tissu	-

SIA-380/4-Tool Beleuchtung

Objekt

Projekt: Waha AG, Industriemstrasse 9, 8050 Zürich

Projekt-Typ: Neubau

Projektstand: Projekt

Bauherr: Waha AG

Architekt: Martin Mustermeier architekten Zürich

Elektroplanung: Anselm + Walther AG, Zürich

Beleuchtungsplanung: Anselm + Walther AG, Zürich

Ersteller Nachweis: Anselm + Walther AG, Zürich

Datum: 09.11.2008

Zusammenfassung

Flächen

	Vorprojekt	Projekt
Nettofläche		256 m ²
Energiebezugsfläche (EBF)		286 m ²
Faktor Nettofläche zu EBF		0,91

Systemanforderungen

	Projektwert	Grenzwert	MINERGIE	Zielwert
Vorprojekt	kWh/m ²			
	l/m ²			
	MWh			
Projekt	kWh/m ²	15,5	25,7	14,0
	MJ/m ²	50,8	84,1	45,8
	MWh	4,0	9,5	3,6

MINERGIE ECO Vorprojekt: Projekt: 54%

MINERGIE grün = erfüllt rot = nicht erfüllt

Definition MINERGIE Beleuchtung

Grenzwert ← 3/4 → 1/4 → Zielwert
MINERGIE ↑

Le planificateur-électricien qui n'incorpore dans son projet ni détecteur de mouvement ni capteur de lumière du jour en raison des coûts? Le concepteur d'éclairage qui doit viser un concept plus simple avec une efficacité plus élevée? Bien entendu, pour atteindre un objectif, il faut unir ses forces et non pas faire preuve d'un orgueil mal placé.

Et ensuite?

Il est évident que la valeur limite peut être atteinte de justesse. Des mesures d'optimisation sont alors nécessaires. Il est donc important que tous soient ouverts d'esprit, y compris le maître d'ouvrage. Le concepteur technique qui gère le justificatif n'est pas seul responsable, mais tous ceux qui participent au processus le sont. Grâce à l'évaluation du justificatif, il est déjà possible de définir très directement dans quelle direction et avec quel potentiel apporter des corrections. Un entretien entre le planificateur électricien et le maître d'ouvrage, aborde la question des plus-values et amène à l'utilisation de capteurs de lumière du jour et de détection de présence, en raison de la diminution des heures à pleine charge.

D'autres entretiens suivent. L'architecte est prêt à peindre en blanc le plafond au lieu de le laisser brut. Ainsi, la réflexion du plafond augmente de 30 à 40 % pour atteindre plus de 80 %.

Le concepteur d'éclairage rencontre un problème: le luminaire utilisé est déjà un luminaire certifié Minergie. Que peut-on encore améliorer?

Illustration 7.12: L'exigence est désormais atteinte, voire dépassée. Une gradabilité supplémentaire est possible, permettant de réaliser des économies supplémentaires.



Illustration 7.13: Le concept de base.



Illustration 7.14: Le concept optimisé.

Valeur limite	25,7 kWh/m ²	
Valeur Minergie	14,0 kWh/m ²	
Valeur du projet	9,4 kWh/m ²	
	Bureau	Circulation
Eclairage lumineux	710/620 lx	290 lx
Luminaire	2/35 W (75 W)	Erco Parscan 1/35 W (45 W)
Détecteur de présence	oui	non
Régulation de la lumière du jour	oui	non
Réflexions de la pièce	normal	sombre
Système de stores	Stores en tissu	–

SIA-380/4-Tool Beleuchtung

Objekt		Zusammenfassung				
Projekt	Waha AG Industriestrasse 9 8050 Zürich	Flächen				
Projekt-Typ	Neubau	Nettofläche	Vorprojekt	Projekt		
Projektstand	Projekt	Energiezugfläche (EBF)			255 m ²	
Bauherr	Waha AG	Faktor Nettofläche zu EBF			290 m ²	
Architekt	Martin Mustermeyer architekten Zürich				0,91	
Elektroplanung	Amstein + Walther AG Zürich	Systemanforderungen				
Beleuchtungsplanung	Amstein + Walther AG Zürich	Vorprojekt	Projektwert	Grenzwert	MINERGIE	Zielwert
Ersteller Nachweis	Amstein + Walther AG Zürich	kWh/m ²				
Datum	09.11.2008	MJ/m ²	9,4	25,7	14,0	10,1
		MWh	30,6	84,1	45,6	33,0
		MWh	2,4	6,5	3,6	2,6
		MINERGIE ECO	Vorprojekt		Projekt	60%
		MINERGIE	grün = erfüllt	rot = nicht erfüllt		
		Definition MINERGIE Beleuchtung				
		Grenzwert	3/4	1/4	Zielwert	
			MINERGIE			

Il s'avère que beaucoup de lumière est indirectement perdue par le trajet parcouru en raison de la hauteur des pièces. Le pourcentage direct de la répartition lumineuse pourrait être amélioré et le pourcentage indirect utilisé seulement pour l'éclairissement du plafond. Cette stratégie fonctionne toujours. La lumière doit être fournie pour la tâche visuelle. Le luminaire recherché doit donc fournir une meilleure répartition de la lumière.

Au lieu d'un pourcentage indirect de 70 %, le luminaire recherché doit diffuser vers le bas le pourcentage principal du flux lumineux. Ce qui réduit directement le trajet de la lumière et peut même également réduire la puissance de l'éclairage.

Autres exemples

Des études dans les hôpitaux ont montré que l'énergie pour l'éclairage est principalement nécessaire dans les zones de circulation. Cela vient du fait que la plupart des lampes fluorescentes ou fluocompactes utilisées sont certes commutables et graduables mais ne sont en service que 20 à 30 minutes après l'allumage, ceci afin de respecter leur durée de vie. En outre, dans de nombreux cas, les détecteurs de présence ne sont pas non plus en mesure d'effectuer des détections précises. Les détecteurs de mouvement coûtent cher, ce qui fait qu'on les utilise le moins possible. C'est la même chose pour les bâtiments administratifs.

Plusieurs études ont démontré, par exemple, que dans les zones de circulation (couloir), 90 % de l'énergie pourraient être économisés, uniquement avec des commu-

tations immédiates et non retardées en raison de l'optimisation de la durée de vie des lampes. Les lampes LED sont conçues pour cela. Le prix des commandes et des capteurs rapides reste cependant un obstacle. Un concept simple consisterait à ce que chaque luminaire soit suffisamment intelligent pour qu'il détecte lui-même la présence ou non d'un être humain à proximité. Cette intelligence irait même jusqu'à regrouper les luminaires pour éclairer un groupe de personnes. Dès que des luminaires isolés ou que le groupe seraient en mouvement, les capteurs réagiraient. Ainsi, la lumière suivrait la personne et ne serait activée que là où celle-ci s'arrête, ou se déplace. Une condition importante du moins pour la zone du couloir.

Puisque chaque utilisation possède une focalisation différente ou une tâche visuelle différente, chaque cas doit être différencié. Les exigences restent alors souvent les mêmes pour le local, même si elles sont formulées différemment. Ainsi, naît le besoin d'aperçu et de définition des surfaces de limitation du local.

Le concept de Human-Sensitive-Lighting est encore visionnaire, mais sa réalisation devient de plus en plus réaliste. Il s'agit pour l'essentiel de disposer aujourd'hui des bonnes sources lumineuses mais les éléments de commande ne présentent pas encore ce niveau technique. Les réticences concernant la mise en réseau font le reste.



Illustration 7.15: Couloir éclairé de façon conventionnelle (en haut) et mise en oeuvre du concept Human-Sensitive-Lighting (en bas).

7.3 Norme d'éclairage SN EN 12464-1:2013

Tandis que la norme SIA 387/4 décrit et évalue les exigences énergétiques, la norme SN EN 12464 fait foi pour les aspects d'éclairagisme. La norme SN EN 12464-1 (édition 2011) constitue la norme principale de base pour les applications lumineuses (SN = norme suisse, EN = norme européenne). Cette norme décrit principalement les critères de la planification d'éclairage au moyen du confort visuel, de la performance visuelle et de la sécurité. L'éclairage lumineux, l'uniformité, la différence entre tâches visuelles directes et environnement, la luminance et les rapports de contraste, etc. sont également décrits. L'éblouissement et les moyens d'éviter l'éblouissement physiologique et psychologique constituent des thèmes centraux. Le diagramme de Söllner donne des indications sur les précautions particulières à prendre pour éviter l'éblouissement si l'axe de vision est au-dessus de l'horizontale (Illustration 7.16). Il montre l'évaluation d'un luminaire indépendamment de sa position. Les critères limites qui s'y rapportent sont définis dans la norme DIN 5031-1 «Eclairage avec la lumière artificielle». Dans la normalisation, cependant, le procédé UGR a remplacé la méthode Söllner (Pour une

évaluation plus précise, il est toujours utile d'utiliser à la fois Söllner et UGR). L'UGR («Unified Glare Rating») est un indice développé par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) pour l'harmonisation mondiale de l'évaluation de l'éblouissement. Grâce à cet indice, les luminaires sont évalués de manière combinée avec le local ainsi que la présence et la quantité d'éblouissement et, cela en fonction du lieu de l'observateur. Même un luminaire considéré comme éblouissant selon le procédé des courbes limites de Söllner peut, s'il est correctement placé dans le local, ne pas être éblouissant pour un observateur. La procédure de la courbe limite ne concernait que le luminaire. La procédure UGR comprend l'ensemble de la salle, mais elle est néanmoins soumise à certaines restrictions quant à sa validité. Ces limites du procédé UGR sont à respecter en particulier en cas de:

- Luminaires à pourcentage indirect élevé (pourcentage indirect supérieur à 65%)
- Grandes sources lumineuses et plafonds lumineux (angle de la pièce supérieur à 0,1 sr, en règle générale, la zone d'éclairage mesure plus de 1m²). Stéradian est symbolisé par «sr».

Ces limites se justifient par l'influence de la luminance relative aux dimensions de la source d'éblouissement sur les capaci-

Diagramme de Söllner MODULISA 950

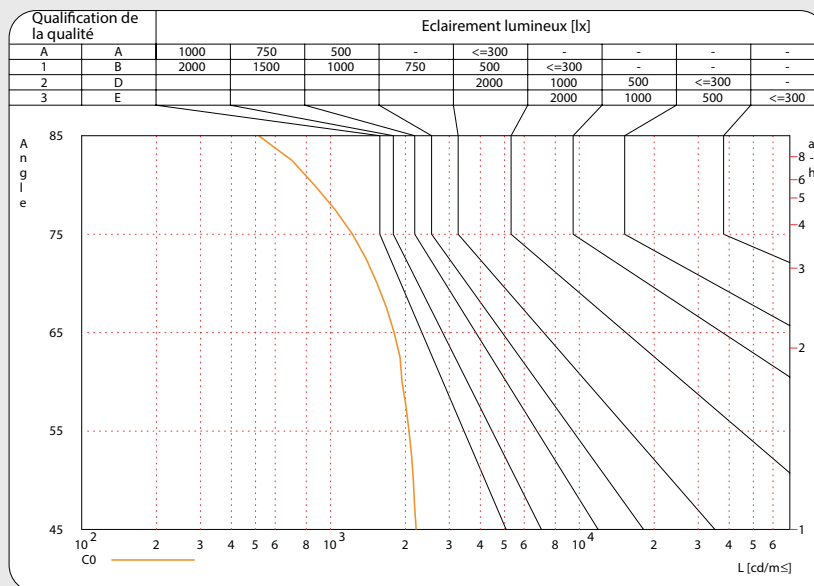


Illustration 7.16: Procédé de courbes limites selon Söllner (Diagramme de Söllner).

tés d'adaptation de l'œil. Ce qui fait que l'influence de la luminance de fond, qui représente une grandeur importante dans la formule UGR, diminue avec l'éblouissement.

Comme aucune notion de taille réelle de luminaire n'est liée à la limite supérieure pour le champ d'application du procédé UGR et donc à la limite inférieure pour le traitement de plus grandes sources lumineuses, le comité de la CIE 3.01 «Glare from small and large sources» propose de définir les luminaires de grande taille par une extension de plus de 1,5 m². Comme alternative, une couverture du plafond avec des luminaires (Ceiling coverage, «CC») de CC supérieur à 0,15 est proposée comme limite inférieure pour les grandes sources lumineuses. CC correspond au pourcentage de la surface de luminaires éclairants par rapport à la surface totale du plafond. L'éblouissement ne dépend pas que de la taille des sources lumineuses mais également, dans une moindre mesure, de leur position, de l'angle de la pièce ou de la luminance de fond. Il est donc justifié de définir l'éblouissement des sources lumineuses de grande taille par l'évaluation de leur luminance et de limiter cette dernière par la fixation d'une valeur maximale autorisée. La norme DIN 5035 recommande une valeur limite de 500 cd/m². Pour les postes de travail informatisés, écrans compris, la nouvelle norme SN EN 12464-1 va jusqu'à une luminance de 3000 cd/m² couvrant tous les luminaires présents dans un local.

Très petites sources lumineuses (angle solide de la pièce inférieur à 0,0003 sr)

Conformément à la loi Riccoschem, en dessous de la représentation de la source lumineuse inférieure à une certaine grandeur, la sensation de luminosité n'est plus définie par la luminance mais directement par l'éclairage lumineux produit sur la zone de la pupille. Cet éblouissement peut aussi bien se produire dans des locaux bas de plafond que dans des locaux hauts de plafond. Dans les locaux bas de plafond, il peut être produit par des angles d'observation plats, dans les pièces hautes par

l'observation directe des lampes ayant des flux lumineux élevés.

Les dérangements produits par l'éblouissement dans le processus visuel peuvent se produire en tant qu'éblouissement psychologique, ou physiologique sous forme d'effet de voile ou de reflet. L'éblouissement psychologique est un trouble subjectif qui n'est pas lié à des anomalies de contraste mesurables. En conclusion, la plus grande attention doit être portée au chapitre sur l'éblouissement et la limitation de ce dernier. Souvent, sur ce point précis, la qualité lumineuse, en elle-même, est négligée par ignorance et par ses répercussions sur les coûts. Cependant, les derniers développements montrent également que les sources lumineuses extrêmement bien protégées contre l'éblouissement ne causent pas d'éblouissement malgré une ouverture de sortie de lumière réduite au minimum. En particulier, il convient également de mentionner qu'un système doit être contrôlé pour déceler les infractions à la réglementation ou les anomalies.

Eclairage intérieur; les principales modifications apportées à l'édition 2002

- L'importance de la lumière du jour a été prise en compte de telle sorte que les exigences en matière d'éclairage peuvent être appliquées indépendamment de l'heure du jour, c'est-à-dire la lumière artificielle, la lumière du jour ou une combinaison des deux.
- Exigences minimales d'éclairage pour les murs et les plafonds
- Exigences relatives aux éclairages cylindriques et informations détaillées sur la modélisation
- L'uniformité de l'éclairage est assignée individuellement aux tâches et activités visuelles.
- Définition d'un «arrière-plan» avec les exigences d'éclairage correspondantes
- Définition d'une grille d'éclairage lumineux selon SN EN 12464-2
- Nouvelles limites de luminance pour les luminaires pouvant être réfléchis sur les écrans plats.

Utilisations	Eclairage lumineux (lux)
Salle d'opération	1000
Bureau, salle de conférence, salle de classe, auditoire, salle de gymnastique (compétition), cuisine, salle de traitement, atelier (travail fin)	500
Salle des maîtres, vente (sans éclairage accentué), salle polyvalente, local des infirmières, atelier (travail grossier), salle de gymnastique (sport scolaire)	300
Hall des guichets, bibliothèque, restaurant, cantine, cages d'escalier, couloirs (hôpital), WC, vestiaires	200
Chambre des patients (sans examen), couloirs, locaux annexes	100
Parking souterrain	75
Habitat, chambre d'hôtel	50

Utilisations	UGR
Travaux très fins	inférieur à 16
Bureau, salle de classe, chambre des patients	inférieur à 19
Vente, restaurant, salle de gymnastique	inférieur à 22
Couloir, WC, parking souterrain, locaux annexes	inférieur à 25
Domaine extérieur	supérieur à 25

Valeur limite UGR	Classe de qualité LiTG/CIE DIN 5035-1	Evaluation	Genre de travail
16	A/A	Eblouissement entre absent et perceptible	Tâche nécessitant une très grande acuité visuelle
19	1/B		Tâche nécessitant une grande acuité visuelle
22	2/C	Eblouissement perceptible	Tâche nécessitant une acuité visuelle moyenne
25	3/D		Tâche nécessitant une faible acuité visuelle
28	-/E	Eblouissement entre perceptible et dérangeant	Postes de travail non occupés en permanence pour des tâches ne nécessitant pas une grande acuité visuelle

Également en vigueur:

■ **Eclairage lumineux cylindrique:**

Eclairage lumineux vertical comme base de la communication et de la perceptibilité visuelles.

■ **Modélisation:** Facteur pour la pondération entre lumière diffuse et dirigée.

■ **Température de couleur:** Dépend normalement de l'ambiance et de la position géographique, peut toutefois varier au fil du temps ou selon les tâches à effectuer. Cet aspect est subjectif. Un autre aspect intéressant est la gestion de la profondeur de champ, qui fonctionne mieux dans la zone de bleu au-dessus de 5300 K que dans la zone de blanc chaud inférieure à 3300 K. Finalement, la température de couleur peut être accordée à la couleur des objets, pour obtenir d'une surface en bois par exemple le caractère même du bois.

■ **Rendu des couleurs:** Le rendu des couleurs peut être essentiel pour classer les matériaux, découvrir les pigments de la peau ou pour évaluer qualitativement les produits. De même, il influence la performance visuelle et la sensation. Par conséquent, la lumière doit être de qualité et couvrir l'ensemble du spectre, et ne pas se limiter aux couleurs sélectionnées.

■ **Scintillement et effets stroboscopiques** sont aujourd'hui considérablement supprimés en raison des ballasts installés. Dans le domaine industriel des contrôles de matériaux et d'évaluation qualité, les fréquences doivent cependant être définies de manière précise, puisqu'elles représentent également des sources de danger justement dans la zone de hautes fréquences. Dans un tunnel, les fréquences de scintillement critiques sont connues sous le nom de «flicker». L'action de ces fréquences de scintillement doit être réduite par la formation de groupes de luminaires et par des mesures de protection pour les galeries. Les fréquences critiques se situent entre 4 et 15 Hz.

■ **Facteur de maintenance:** Autrefois connu sous le nom de «facteur de planification», ce facteur a été redéfini dans la norme d'éclairage par le facteur de maintenance. Il est très vaste puisque différents paramètres comme la maintenance du flux

Tableau 7.1: Eclairages lumineux selon la norme SN EN 12464.

Tableau 7.2: Indice d'éblouissement recommandé selon la norme SN EN 12464 (valeurs UGR).

Tableau 7.3: La définition des limites d'éblouissement visuel repose sur la satisfaction de 2/3 des utilisateurs.

*LiTG = Lichttechnische Gesellschaft
CIE = Commission Internationale de L'éclairage
DIN = Deutsches Institut für Normung.*

lumineux des lampes, des luminaires, de la durée de vie des lampes et des surfaces des locaux définissent ensemble le facteur de maintenance. Ce dernier désigne également la philosophie stipulant que la lumière n'est plus seulement le résultat d'une lampe, mais plutôt d'un système global, qui définit de manière ciblée et plus précisément les effets atteints dans l'espace sur les surfaces et les luminaires utilisés. Le facteur de maintenance de 0,8 peut être utilisé pour les exigences Minergie, si on peut partir du principe que ces locaux sont nettoyés au moins une fois par an.

■ **Le planificateur** doit donc indiquer le facteur de maintenance et les hypothèses correspondantes, définir le dispositif d'éclairage conformément à la tâche visuelle et élaborer un plan de maintenance global compréhensible.

■ **Exigences d'efficacité énergétique:** En raison des débats politiques concernant l'avenir de la production énergétique, les exigences d'efficacité et les économies sont très actuelles. La norme européenne SN EN 15193 («Évaluation de l'exigence énergétique concernant l'éclairage dans les bâtiments») est suffisamment large pour admettre différents procédés de calcul (méthode de calcul simple ou méthode de calcul et de mesure complexe). Les comparaisons (benchmarking) n'étant pas courantes, son utilisation est peu commune en Suisse. Il faut ajouter que l'exigence Minergie est validée par la norme SIA 387/4 et peut être comparée.

Révision de la norme SN EN 12464-1

La norme européenne définit, depuis novembre 2002, les exigences pour l'éclairage des places de travail. Une norme révisée a été publiée en 2011, qui contient des insuffisances et des interprétations erronées. De plus, l'utilisation généralisée des LED est devenue de plus en plus importante. Cette norme est encore valable et va être révisée. D'ici 2020, elle devrait entrer en force.

Ce qui sera nouveau?

■ La lampe sera remplacée par la source lumineuse. Depuis le début du millénaire, les

LED ont gagné du terrain dans le secteur de l'éclairage et ont également gagné des parts de marché significatives grâce à leurs capacités d'optimisation énergétique, leur distribution spectrale et autres propriétés positives.

■ Les spécifications relatives à l'effet non visuel de la lumière et à la luminosité de la pièce sont insérées. La variabilité de la lumière et l'influence de la lumière du jour sont soulignées. L'objectif est de stimuler de nouvelles approches en matière de conception de l'éclairage.

■ La valeur de maintenance de l'éclairage est spécifiée de telle sorte qu'elle ne fonctionne plus comme un objectif de planification mais qu'elle est reconnue comme une valeur critique inférieure. D'une part, cela ouvre la voie à une remise en question critique des valeurs standard, mais aussi, bien sûr, des valeurs plus élevées, par exemple pour certaines tâches visuelles ou pour éviter des erreurs coûteuses.

■ En raison de la variété de LED, l'angle anti-éblouissement sera défini avec des paramètres supplémentaires afin de spécifier la luminance maximale et la vue directe vers la source lumineuse.

■ La procédure UGR offre de nombreuses possibilités d'interprétation qui induisent en erreur. En partie à cause de l'ignorance ou du manque d'intérêt, il n'est pas utilisé ou est mal utilisé. Il faudrait y remédier en n'appliquant plus directement la formule, mais en utilisant des tableaux. En outre, il est fait référence à l'éblouissement causé par la lumière du jour.

■ Dans la nouvelle section Considérations de conception, une approche est fournie sur la façon d'éclairer la zone, la tâche visuelle et la pièce, mais aussi sur la façon d'utiliser l'éclairage.

■ Les tableaux de la section 5 ont toujours attiré le plus d'attention. D'une part, parce qu'ils sont simples et compréhensibles, et d'autre part, parce qu'ils peuvent être appliqués directement. Toutes les informations qui doivent être prises en compte lors de la planification d'une installation d'éclairage doivent désormais s'y trouver également.

7.4 Nouvelle norme sur la lumière du jour EN 17037

Avec la norme EN 17037, la lumière du jour dans les bâtiments dispose d'une norme adéquate et actualisée qui remplace l'ancienne DIN 5034 de 1935. 85 ans se sont écoulés depuis que la lumière du jour est devenue plus importante. En fait, les connaissances sur la lumière du jour ne changent pas et que le progrès technique ne va pas forcément de pair. Néanmoins, l'utilisation de la lumière du jour s'est considérablement améliorée grâce aux progrès techniques et s'est taillée une place importante grâce à l'optimisation énergétique.

Aujourd'hui, nous passons jusqu'à 90% de notre temps dans des espaces fermés et 80% de nos impressions sensorielles passent par les yeux. L'importance de la lumière pour la santé, la forme physique, la concentration et le confort a été sous-estimée pendant trop longtemps et ignorée en raison des exigences en matière d'énergie. La norme européenne EN 17037 «Lumière du jour dans les bâtiments», adoptée en Suisse sous le nom de SN EN 17037 «Lumière du jour dans les bâtiments», contient des recommandations applicables dans toute l'Europe pour l'alimentation en lumière du jour et la qualité de cette lumière.

Tous les contenus de la directive SLG «Éclairage intérieur avec lumière du jour», de la norme suisse SIA 387/4 et de la norme allemande DIN 5034 «Lumière du jour dans les intérieurs» ne sont pas couverts par SN EN 17037. Elle peut être appliquée à toutes les pièces qui sont utilisées pendant de longues périodes et régulièrement. La norme formule des recommandations en trois étapes pour chacun des quatre critères suivants (Illustration 7.17):

- Disponibilité en lumière du jour
- Connexion visuelle vers l'extérieur (vue)
- Évaluation de l'éblouissement
- Ensoleillement minimum (exposition à la lumière du soleil).

Les niveaux de recommandation peuvent être utilisés pour la planification et le calcul, mais aussi pour le contrôle des conditions

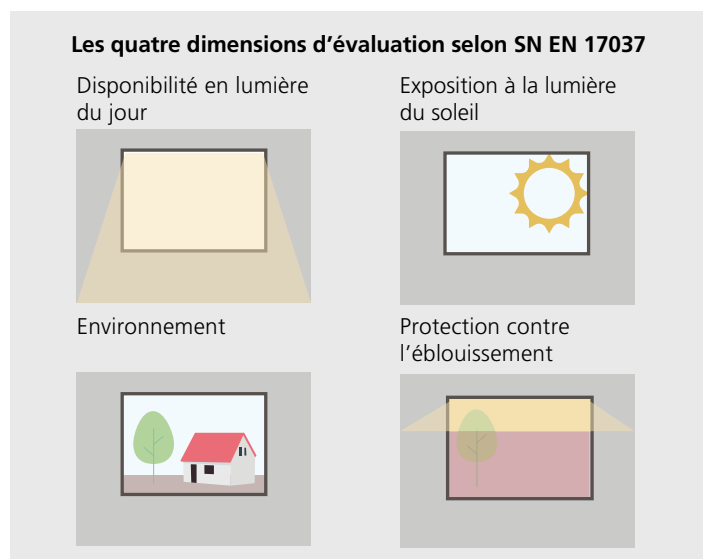
d'éclairage naturel. Étant donné qu'il n'y a pas actuellement d'attribution des utilisations des pièces respectives aux niveaux recommandés, il est possible de convenir d'exigences relatives aux objets pour l'utilisation de la lumière du jour par les parties impliquées dans la construction.

1. Disponibilité en lumière du jour

L'influence de la lumière du jour sur les besoins énergétiques des bâtiments est évaluée depuis longtemps sous l'angle de l'éclairage utile relatif – «autonomie en lumière du jour». La norme SN EN 17037 inclut également la disponibilité de la lumière du jour au fil du temps dans l'évaluation sous le terme «alimentation en lumière du jour». Selon la norme SN EN 17037, une pièce est considérée comme suffisamment éclairée par la lumière du jour si l'éclairage cible est atteint sur une partie définie d'un plan de référence pendant au moins la moitié des heures d'éclairage naturel. Cela correspond à une exposition utile relative («autonomie en lumière du jour») de 50%. Ceci peut être démontré soit par une simulation détaillée à l'aide d'un logiciel validé, basé sur les normes (SIA 387/4), soit par une procédure simplifiée spécifiée dans la norme SN EN 17037 basée sur le quotient de lumière du jour.

Dans la procédure de vérification simplifiée, les rapports minimaux de lumière du jour sont spécifiés, en fonction de l'emplacement géographique et du climat, en

Illustration 7.17: Les quatre critères d'évaluation de la norme sur la lumière naturelle SN EN 17037. (Source: Minergie)



supposant exclusivement un éclairage diffus du ciel et des ouvertures de façade vitrées. Il s'agit de s'assurer que les valeurs d'éclairement souhaitées, par exemple 300 lx, sont atteintes par la seule lumière naturelle, pendant au moins 50 % de sa durée sur au moins 50 % de la surface utile (Illustration 7.18). En Suisse, pour des façades verticales, un quotient-cible de lumière du jour D («Target Daylight Factor») s'applique: 1,9 % pour un éclairement de 300lx (D300), 3,1 % pour 500 lx (D500) et 4,7 % pour 750 lx (D750). Pour un puits de lumière, les valeurs suivantes s'appliquent: 1,4 % (D300), 2,3 % (D500) et 3,5 % (D750). L'ancienne valeur limite de 0,9 % pour les locaux dans la situation d'une façade verticale, selon la norme DIN 5034, n'est pas prise en considération dans la nouvelle norme. Dans le modèle simplifié selon la norme SN EN 17037, l'«alimentation en lumière du jour», en ce qui concerne les paramètres de la façade, dépend exclusivement du facteur de transmission du vitrage utilisé. La forme et l'effet de la protection contre le soleil et l'éblouissement ne sont pas pris en compte.

Problème: la direction de la lumière du soleil manque. La protection contre le soleil et l'éblouissement n'est pas considérée.

Points importants

- Tenir compte des différences géographiques (préciser les mêmes niveaux d'éclairement intérieur).
- Préciser les trois niveaux de lumière du jour: faible, moyen, élevé (pour tous les critères).
- Utiliser des méthodes de calcul actualisées (au lieu de graphiques et de formules), par exemple des simulations tout au long de l'année (par heure).
- Le quotient de lumière du jour n'est plus actuel.

Quotient et autonomie

Le quotient de lumière du jour D (souvent aussi FLJ) est le rapport entre l'éclairement horizontal en un certain point de la pièce et l'éclairement horizontal à l'extérieur. Les valeurs types du quotient d'éclairage naturel se situent entre 2 % et 12 %.

L'autonomie en lumière du jour indique la proportion d'heures d'utilisation pendant lesquelles un poste de travail est suffisamment éclairé par la lumière naturelle. Tout comme le quotient, l'autonomie en lumière du jour est déterminée par l'emplacement du poste de travail et, en particulier, par la profondeur de la pièce. L'autonomie en lumière du jour dans une pièce se situe généralement entre 10 % et 90 %.

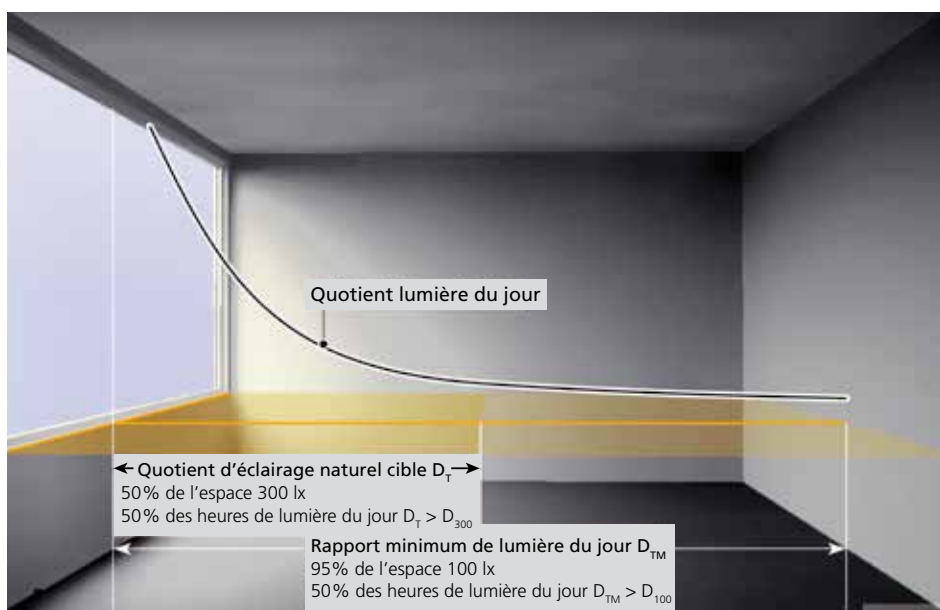


Illustration 7.18: Concept de disponibilité de la lumière du jour («apport de lumière du jour») selon EN 17037. (Graphique: Fraunhofer IBP)

2. Vision

Pour certaines places d'observateur dans le bâtiment, la vue peut à l'avenir être classée en fonction d'un angle de vue horizontal, d'une distance de vision extérieure et du type d'environnement («pas de ligne d'horizon, pas de concept de ligne de sol») avec les niveaux de recommandation «faible, moyen, élevé» (Illustration 7.19). Ici, l'angle de vision horizontal et la distance de vision extérieure sont des critères d'évaluation qui dépendent de la taille et de l'emplacement de l'ouverture de la façade. Une grande surface vitrée a généralement un effet positif sur l'évaluation.

Points importants

- Disponibilité en lumière du jour → autonomie en lumière naturelle
- Niveau d'éclairage (lx) minimum → moyen → élevé (300 lux – 500 lux – 750 lux)
- Liens visuels selon les angles géométriques (pour le ciel, le sol et l'environnement construit)
 - 14°, sol
 - 28°, sol et ciel ou environnement construit
 - 54°, sol, ciel et environnement construit

3. Exposition à la lumière du soleil

Pour les locaux, la norme donne des recommandations minimales pour l'exposition à la lumière du soleil. Les points de

référence se trouvent dans le plan de la fenêtre (Illustration 7.20). L'évaluation est indépendante de la taille réelle de la fenêtre. Selon l'illustration 7.20, l'ensoleillement minimum sur la partie intérieure de la fenêtre, par temps clair entre le 1^{er} février et le 21 mars, doit être de 1,5 h pour un ensoleillement faible, de 3 h pour un ensoleillement normal et pour un bon ensoleillement de 4 h en moyenne.

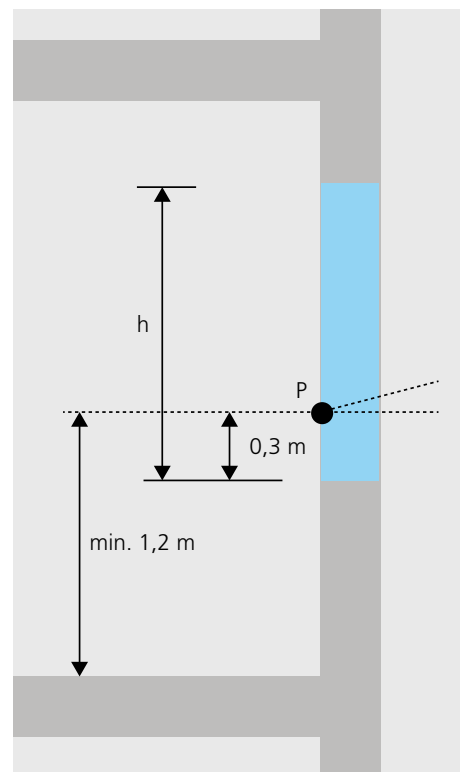
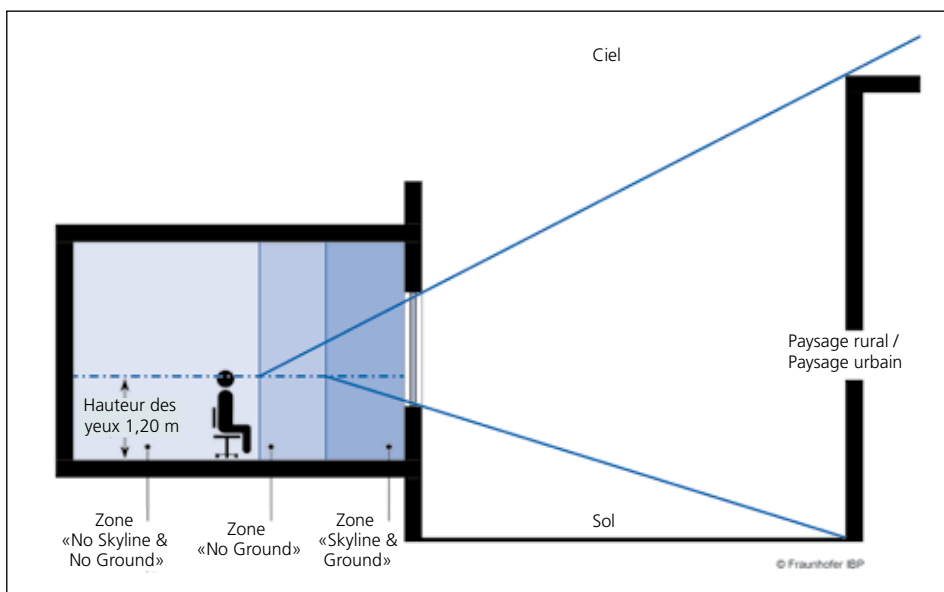


Illustration 7.20: Section destinée à définir les points de référence pour l'évaluation de l'exposition au soleil ou de sa hauteur à l'intérieur de la vitre.

Illustration 7.19: Présentation du concept «No-Skyline, No-Ground-Line-Concept» pour une classification simplifiée des perspectives Selon EN 17037. (Graphique: Fraunhofer IBP)



4. Protection contre l'éblouissement de la lumière du jour

Pour les locaux servant à la lecture, l'écriture ou l'affichage, il est recommandé d'utiliser des dispositifs d'ombrage. Le «Daylight Glare Probability» (DGP) est utilisé pour évaluer l'effet d'une protection contre l'éblouissement. Il s'agit donc en premier lieu d'une protection contre le soleil et l'éblouissement. Dans le cas des vitrages, seuls les «vitrages à faible transmission» ou les «vitrages électrochromes» qui, à l'état commuté, ne présentent que de très faibles valeurs de transmission lumineuse, peuvent être évalués. Pour les vitrages à transmission lumineuse plus élevée, on suppose qu'ils ne peuvent pas offrir une protection suffisante contre l'éblouissement. **Taux d'éblouissement:** Daylight Glare Probability (DGP) dans 95 % du temps d'utilisation, DGP inférieur à 0,45 – 0,40 – 0,35.

Tendances – produits

■ **Protection solaire Okasolar:** Okasolar 3D est un vitrage isolant, contenant une grille de protection solaire hautement réfléchissante, placée dans la cavité entre les pans de verre. La géométrie de la grille de protection solaire a été optimisée pour les applications en toiture. La transmission directe du soleil est bloquée en permanence, peu importe la position du soleil.



Illustration 7.21:
Okasolar 3D – vitrage isolant, contenant une grille de protection solaire tridimensionnelle.
(Source: Okalux GmbH)

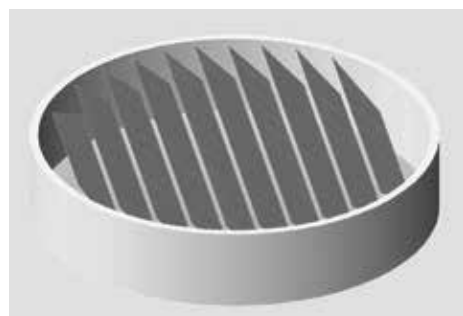


Illustration 7.22:
Héliostat lamellaire.
(Source: Bartenbach)

En même temps, une part importante de lumière naturelle diffuse de l'hémisphère Nord, entre dans la pièce. Il en résulte une répartition homogène de la lumière à l'intérieur et nettement moins de fluctuations de luminosité qu'avec la lumière solaire directe. Grâce à sa grille de protection solaire tridimensionnelle hautement réfléchissante, Okasolar 3D offre:

- Une protection solaire performante
- Un apport de chaleur réduit
- Une faible valeur g
- Une transmission élevée de la lumière
- Une vision partielle vers le Nord
- Une apparence homogène, sans joints, ni joints bout à bout
- Suffisamment de lumière naturelle et réduction de lumière artificielle
- Sans entretien et sans dérangement
- Bonne capacité de recyclage.

■ **Le système BASF «Skynative 0X»** pour le guidage de la lumière du jour a été développé avec l'aide de Bartenbach et spek Design. L'objectif du projet était d'apporter la lumière du jour en profondeur dans le bâtiment avec le moins de perte possible. Contrairement aux systèmes d'éclairage naturel conventionnels, qui fonctionnent principalement avec des lames de déflexion ou des dispositifs similaires, Skynative est composé de trois éléments associés les uns aux autres: une feuille spéciale avec des microstructures intégrées dans la façade guide la lumière du soleil dans un puits de lumière hautement réfléchissant.

*Illustration 7.23:
La lumière du jour améliore les performances et favorise le bien-être. Cette approche fournit de la lumière naturelle pour tous types de bâtiments et de pièces où il faisait sombre auparavant, y compris les sous-sols. (Source: BASF/ spek Design)*



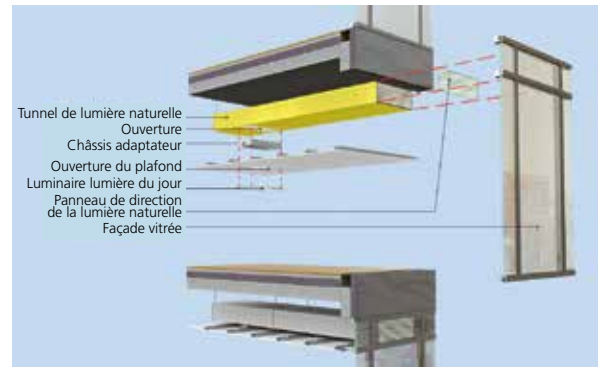
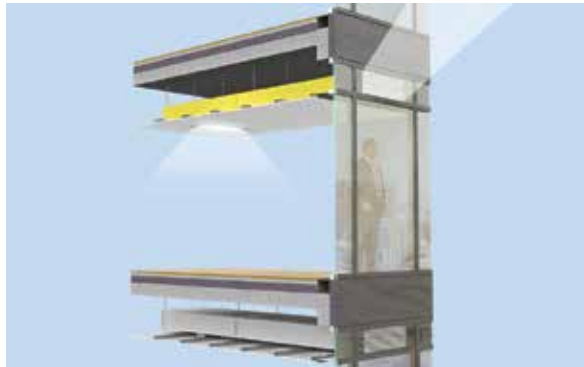


Illustration 7.24:
Système de lumière
du jour «Skynative
0X». (Source: BASF)



Illustration 7.25:
Prototype «Skynative
0X» par Barten-
bach. Vue exté-
rieure et image à
l'intérieur. (Source:
BASF; Bartenbach)



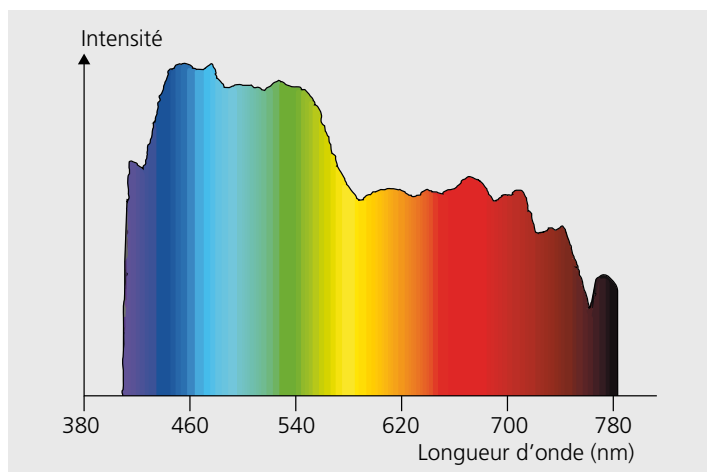
Illustration 7.26:
Prototype «Skynative
0 », Image à
l'intérieur. (Source
BASF; Bartenbach)



Illustration 7.27: Le
prototype «Skynative
0X» permet
une agréable lumi-
nosité même dans
des conditions de
lumière du jour ex-
térieure diffuse
(image de droite).
(Source: BASF;
Bartenbach)

La lumière est ainsi dirigée dans les pièces avec le moins de pertes possibles grâce à des luminaires spéciaux. Les luminaires sont en outre équipés de lampes LED qui fournissent de la lumière lorsque la lumière du jour est insuffisante ou inexistante.

Illustration 7.28: Le spectre de la lumière du jour introduit et transporté dans la pièce montre une progression spectrale pure pratiquement sans aucune réduction. (Source: BASF; Bartenbach)



■ Le système a été testé sur un bâtiment sans ouverture à la lumière du jour ni perspective extérieure. Grâce à un tunnel de lumière du jour de 12 m, l'intérieur du bâtiment paraît vivant et atteint un éclairement de plus de 500 lux au moment de la mesure (Illustration 7.25).

■ Dans une pièce, une fenêtre artificielle en forme d'écran, qui enregistre le monde extérieur par caméra vidéo, a été installée.

Ce couplage visuel avec le monde extérieur réel est très apprécié en Asie (Illustration 7.26, droite). Des immeubles de bureaux, des hôpitaux ou même une maison individuelle en pente – le système ne connaît pratiquement aucune limite pour pénétrer dans les pièces sombres. Les pièces vivent avec le climat extérieur et intègrent le spectre changeant de la lumière du jour à l'intérieur du bâtiment. Hugo Kükelhaus, qui pensait déjà à l'effet biodynamique de la lumière du jour dans les années 1950, en aurait pris un réel plaisir.

Le niveau de la façade n'est pas endommagé et les canaux de guidage de la lumière peuvent être utilisés aussi bien dans les nouveaux bâtiments que dans les rénovations. Il est important que Skynative soit planifié à un stade précoce, de préférence lors de la phase de planification de la conception. Étonnamment, le système ne fonctionne pas seulement en cas d'ensoleillement. Des résultats surprenants ont pu être observés lors de journées nuageuses de janvier (Illustration 7.26). Contrairement à presque toutes les sources de lumière artificielle, le tube d'éclairage naturel se comporte particulièrement bien sur le plan spectral (Illustrations 7.28 et 7.29).

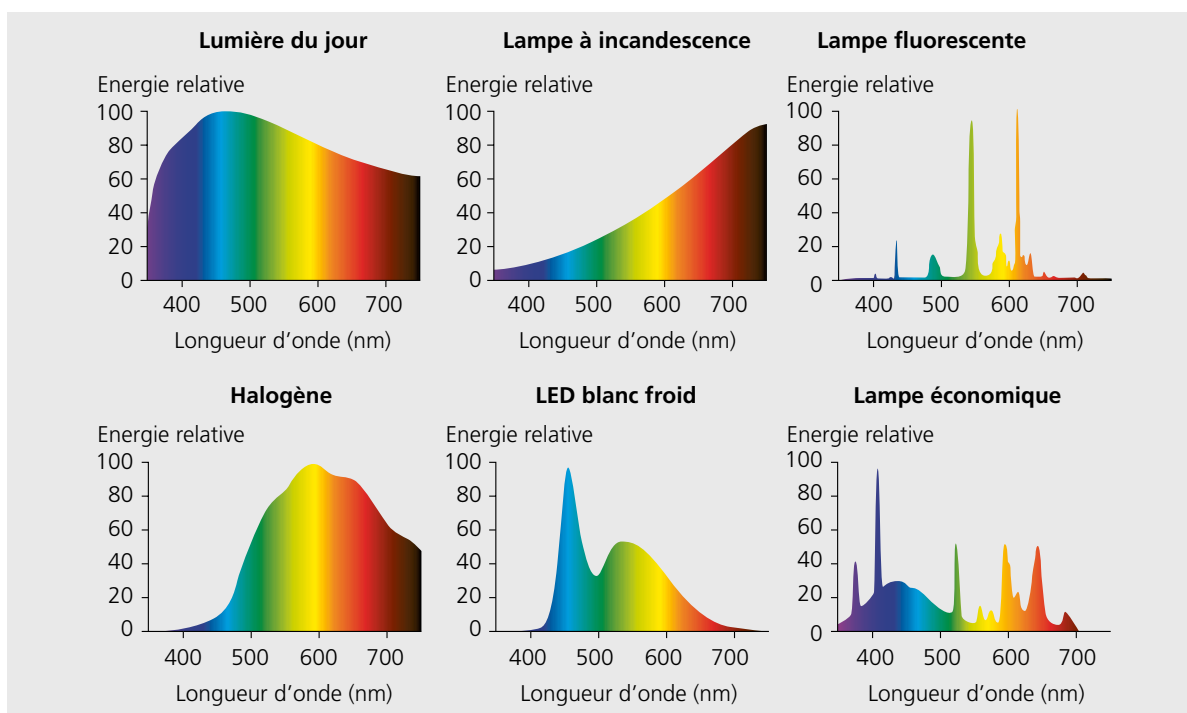


Illustration 7.29: Toutes les sources de lumière artificielle présentent des lacunes et donc des inconvénients par rapport au spectre de la lumière du jour.

7.5 Optimisation de fonctionnement dans les bâtiments existants

Pour le renouvellement d'un éclairage existant, il existe quatre possibilités:

1. Remplacer les lampes
2. Remplacer les luminaires
3. Installer un réglage de lumière ou optimiser les réglages déjà existants
4. Concevoir un éclairage Minergie.

Les coûts d'investissement de ces mesures sont très différents. Souvent, la variante la moins coûteuse n'est pas la plus rentable.

Exemple à partir d'une analyse détaillée: Dans une salle de classe, les mesures ci-dessous peuvent permettre de ramener les besoins en électricité au niveau de la valeur cible SIA.

■ Remplacer les luminaires inefficients par des luminaires efficaces avec une efficacité lumineuse de lampe plus faible et un rendement plus élevé (mesure n°8, Tableau 7.5).

■ Remplacer les commutations manuelles par des détecteurs de présence, combinés à des capteurs de lumière du jour (mesure n°17).

■ Comme protection solaire, installer des lames claires, réglables et situées à l'extérieur (mesure n°22).

Conception globale selon Minergie:

Pour un assainissement global, la solution la plus efficace peut la plupart du temps être trouvée avec un nouveau concept d'éclairage, en particulier dans les locaux où un nouveau positionnement des luminaires est possible.

Illustration 7.30:
Types de culot des lampes Retrofit.

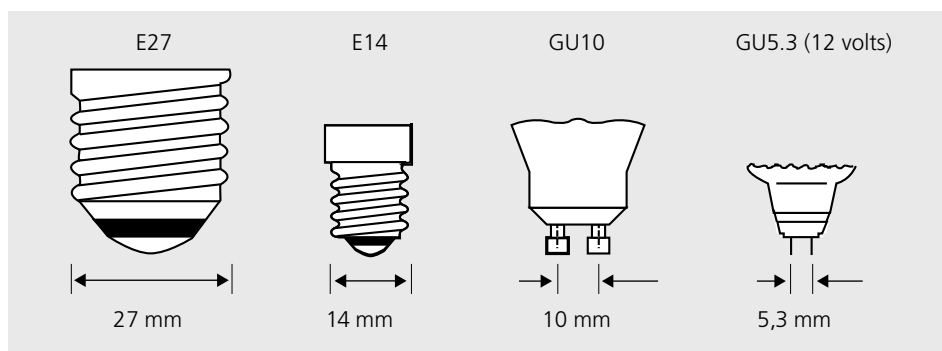


Illustration 7.31:
Différents culots, diamètres et différentes longueurs pour les tubes de remplacement LED.

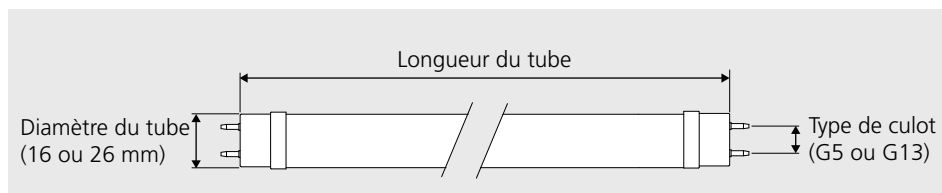


Tableau 7.4: Remplacement des tubes fluorescents par des tubes LED.

Diamètre du tube (désignation)	Culot	Ballasts	Longueur du tube (mm)
26 mm (T8)	G13	B.E. ou B.C.	1500
			1200
			600
16 mm (T5)	G5	B.E.	1449
			1149
			549

Remplacer les lampes (Retrofit)

Mesures 1 à 6 du Tableau 7.5 Les lampes inefficaces (sources lumineuses) sont remplacées une à une par des lampes efficaces ayant le même culot. Pour les lampes dont les culots sont décrits sur les illustrations 7.30 et 7.31, cette mesure est possible.

Remarques

- Pour les lampes à incandescence et halogènes graduables, il existe des lampes LED de remplacement spéciales.
- Les lampes LED graduables sont disponibles. Il faut faire attention à la puissance minimale du gradateur utilisé. Il existe des gradateurs spécifiques pour les lampes LED à basse puissance.
- Respecter impérativement les dimensions: Quelques lampes LED sont plus grandes que les lampes à incandescence ou halogènes à remplacer.
- Pour les tubes LED, il convient de noter qu'il existe différents types de luminaires de remplacement avec des ballasts conventionnels (B.C.) ou électroniques (B.E.).

Remplacer les luminaires

Mesures 8 à 12 du Tableau 7.5. Si les lampes ne peuvent pas être remplacées en raison de culots ou de dispositifs de fonctionnement inadaptés, le remplacement des luminaires peut se questionner. Souvent, le nouveau luminaire peut être placé au même endroit de manière à éviter d'importantes dépenses d'installation.

■ Les luminaires à rayonnement indirect sont la plupart du temps inefficaces parce que la lumière est reflétée sur un plafond plus ou moins clair et sur une plus grande distance. Un éclairage optimal diffuse, dans la plupart des cas, une lumière directe avec une partie indirecte pour l'éclaircissement du local.

■ Les éclairages surdimensionnés ne sont pas rares. Parce que l'œil humain est constitué de telle sorte qu'il peut traiter un très large spectre de luminosité (journée ensoleillée: 100 000 lux, nuit de pleine lune: 0.2 lux), mais est relativement peu sensible aux petites différences de luminosité (pour une personne, 600 lux ne sont objectivement pas différents de 500 lux), les installations d'éclairage ne doivent pas être surdimensionnées. Car 600 lux au lieu de 500 signifient 20 % de dépense d'énergie en plus, sans que cela soit perceptible en général.

Installer ou optimiser les réglages de lumière

Mesures 13 à 22 du Tableau 7.5. Les réglages de lumière réalisés dans des conditions optimales peuvent apporter de très grandes économies. Dans de nombreux cas, l'environnement n'est pas optimal: lumière naturelle trop peu utilisable, mauvais positionnement des capteurs, aucun ajustement des capteurs et enfin autoconsommation élevée du réglage.

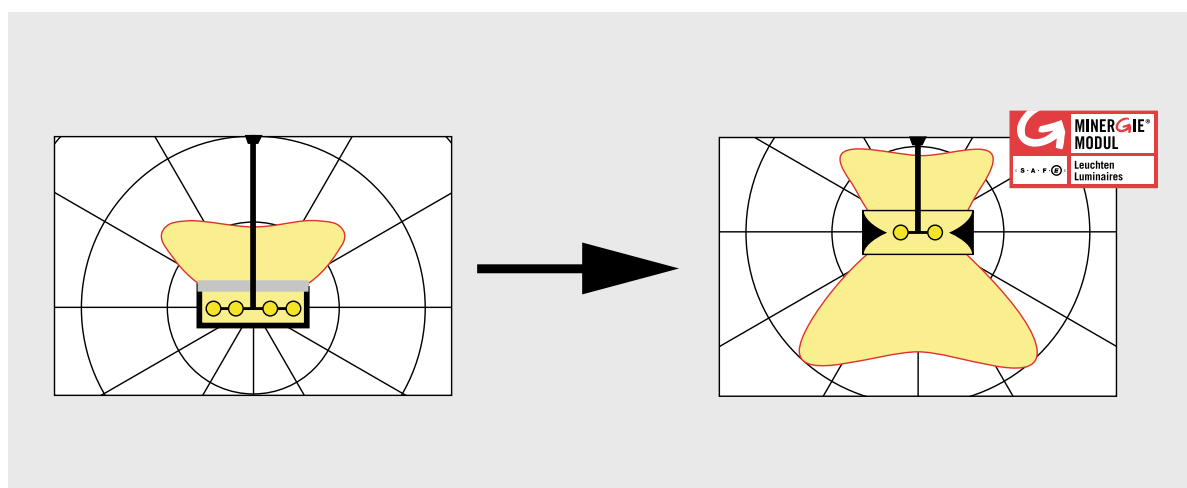


Illustration 7.32: Répartition de la lumière non idéale et optimale.

N°	Mesures	Utilité
1	Remplacer les lampes à incandescence et les ampoules halogènes classiques par des LED. Les puissances de 100 watts, 75 watts, 60 watts, 40 watts ou 25 watts sont remplacées par des LED avec env. 10 % de la puissance de la lampe à incandescence. Types de culot: E27 ou E14.	++
2	Remplacer les spots à incandescence par des spots LED. Les puissances de 100 watts, 75 watts, 60 watts, 40 watts ou 25 watts sont remplacées par des spots LED avec env. 10 % de la puissance des lampes à incandescence. Types de culot: E27 ou E14.	++
3	Remplacer les spots halogènes par des spots LED. Intéressant surtout pour les spots de Type « PAR 50 » avec culots GU 5.3, GU10, E27 et E14 largement répandus. Les halogènes 50 watts correspondent aux LED env. 5 watts.	+++
4	Remplacer les lampes économiques dans le domaine extérieur par des lampes LED. Les lampes économiques usuelles ne conviennent pas pour l'extérieur.	+
5	Remplacer les tubes fluorescents (diamètre 26 mm) avec des ballasts conventionnels (B.C.) par des tubes LED. Pour remplacer un tube de 58 watts, il faut une puissance LED d'environ 24 watts, pour des tubes de 36 watts, d'environ 16 watts. Remarque: contrairement aux tubes fluorescents, les caractéristiques de rayonnement des tubes LED sont généralement unilatérales, ce qui augmente d'une part l'efficacité lumineuse dans la pièce, mais entraîne d'autre part un éclairage différent. Le starter de la lampe fluorescente est remplacé par un élément de shunt intégré.	+++
6	Remplacer les lampes fluorescentes avec des ballasts électroniques (B.E.) par des tubes LED. Remarque: d'autres types de tubes LED que pour les ballasts conventionnels doivent être utilisés! Pas besoin de remplacer le starter, le ballast original (B.E.) reste en service. Les tubes LED pour ballasts électroniques sont disponibles tant pour 16mm (T5) que pour 26 mm (T16). L'économie se monte à plus de 50 %.	++
7	Supprimer les luminaires superflus. Certains luminaires fonctionnent inutilement ou le local est beaucoup trop clair. Dans ce cas, il est recommandé de mettre certains luminaires hors service.	++
8	Remplacer les plafonniers et les luminaires muraux 1 par 1. Remplacer un luminaire inefficace par une puissance inférieure et une efficacité lumineuse plus élevée (au moins 100 lm/W).	++
9	Poser des Downlights avec LED. Dans de nombreux cas, il est possible de remplacer les Downlights usuels avec lampes fluorescentes compactes par des Downlights LED avec le tiers de la puissance.	++
10	Remplacer les chemins lumineux avec tubes fluorescents par des LED. Remplacer les tubes fluorescents insérés dans le plafond (env. 30 W à 50 W par mètre) par des réglottes lumineuses à LED (5 W à 15 W par mètre).	+++
11	Renouveler les luminaires sur pied. Des luminaires sur pied plus anciens avec des lampes fluorescentes compactes avec 4 fois 55 W peuvent être remplacés par des luminaires LED sur pied avec 80 à 120 W et env. 30 % de lumière directe.	+++
12	Remplacer les luminaires de bureau par des LED. Remplacer les lampes à incandescence ou halogènes par des luminaires de bureau avec LED (env. 10 W à 15 W LED par poste de travail).	++

*Tableau 7.5:
Augmentation de
l'efficacité des éclairages – les mesures à prendre.*

N°	Mesures	Utilité
13	Séparer les groupes de luminaires. Le réglage le plus simple de la lumière consiste en la répartition d'une installation d'éclairage sur plusieurs «groupes de lumière». Au lieu d'un seul interrupteur, en installer deux à quatre.	+
14	Intégrer des horloges. Il est efficient et avantageux d'étendre l'éclairage à midi ou le soir au moyen d'une minuterie.	+
15	Intégrer une minuterie. Dans les locaux avec de courtes présences, il est recommandé d'installer des minuteries (déclenchement automatique après 5 à 15 minutes).	++
16	Installer un détecteur de mouvement. Il est recommandé d'installer des détecteurs de mouvement dans les couloirs, vestiaires, stocks et autres locaux similaires avec peu de circulation de personnes; dans les locaux avec lumière du jour, combinés avec des capteurs de luminosité. Réglage recommandé: on et off automatique (auto on/off). Le temps de déclenchement (temps entre la dernière détection de mouvement et l'impulsion d'arrêt du détecteur) doit être réglé sur 2 minutes au maximum dans les zones de circulation.	+++
17	Installer des détecteurs de présence. Dans les bureaux et les salles de classe, il est recommandé de remplacer les enclenchements manuels par des détecteurs de présence; dans les locaux avec lumière du jour, combinés avec des capteurs de luminosité. Réglage recommandé: off automatique, on manuel (c.-à-d. que la lumière ne s'allume pas automatiquement, mais il faut presser un bouton). Le temps de déclenchement (temps entre la dernière détection de mouvement et l'impulsion d'arrêt du détecteur) doit être réglé sur 5 minutes au maximum dans les zones de travail.	++
18	Ajuster le réglage de la luminosité existante. Le niveau de luminosité est souvent incorrect ou mal réglé, ou les temps de déclenchement sont trop longs, et la lumière ne s'éteint pas. Dans les projets concrets, les économies d'énergie pourraient être triplées en réduisant le temps de déclenchement de 15 à 2 minutes.	+++
19	Lampes à détecteur mise en réseau. Les luminaires avec capteurs intégrés et fonction de communication avec d'autres luminaires permettent d'allumer la lumière de manière sélective et proactive exactement là où elle est nécessaire et de l'éteindre ou de la réduire considérablement dans d'autres zones. Convient particulièrement pour les parkings, les cages d'escalier et les zones de passage.	+++
20	Déplacer les capteurs de lumière existants. Pour des raisons architectoniques, les capteurs de lumière sont souvent mal positionnés, ce qui entrave les commutations souhaitées. Le nouvel emplacement devrait être choisi strictement en fonction de la reconnaissance de la lumière du jour optimale ou de la présence.	+
21	Réglage de la luminosité constant. A l'ère des LED, l'impact d'un contrôle constant de la lumière est beaucoup plus important que dans le monde des lampes fluorescentes. Il faut tenir compte de la consommation d'énergie des systèmes de commande parfois complexes.	++
22	Optimiser la protection solaire. La protection solaire optimale est apposée à l'extérieur, elle peut être réglée selon les besoins (lamelles) et doit être claire. Un réglage automatique présente encore une meilleure solution pour autant qu'elle fonctionne. Les stores ou rideaux placés à l'intérieur ne conviennent pas pour l'utilisation de la lumière du jour.	+++

7.6 Rentabilité

Comparer plusieurs offres: Il est recommandé de comparer plusieurs offres car les différences de prix peuvent être importantes. L'offre la plus avantageuse n'est souvent pas la meilleure. Fiabilité, durée de garantie et solidité du fournisseur doivent également servir de critères de sélection. Une prudence particulière doit être de mise avec les nombreux nouveaux fournisseurs de luminaires LED.

Prix «fantaisistes» dans les catalogues: Les prix catalogue pour les lampes, luminaires et accessoires sont des prix à la pièce. Pour un nombre moyen de pièces, des rabais de 20 à 40 % sont accordés. Pour d'importantes commandes, les fournisseurs offrent jusqu'à 70 % de rabais. Exemple: Pour 500 luminaires sur pied au prix de CHF 1300 selon le catalogue, une grande banque a payé seulement CHF 400 la pièce.

Les installations compliquées font augmenter le prix: Dès que des installations électriques doivent être changées, cela peut devenir vite cher. Remplacer des lampes ou des luminaires un par un ou installer un luminaire mobile (lampadaire ou

luminaire de bureau) peut être plus avantageux, même lorsque le produit est plus cher parce que des dépenses d'installation sont nulles. Pour l'équipement ultérieur de capteurs lumineux, il est recommandé de les placer à des endroits où des raccordements de câbles sont présents ou de les intégrer dans l'interrupteur.

Exemples de calculs de rentabilité

Dans les tableaux 7.6 et 7.7, deux exemples (réels) de remplacement des systèmes d'éclairage: Une halle industrielle et un bâtiment scolaire.

■ **Halle industrielle:** Avec un investissement de 11.40 CHF/m², une économie d'énergie de 118 MWh/a (soit 51 % de la consommation initiale) peut être réalisée. L'investissement est amorti en 4.5 ans. L'éclairage est très simple et ne comporte pas de régulation.

■ **Bâtiment scolaire:** L'investissement se monte à 80 CHF/m². L'économie d'énergie se monte à 54 MWh/a et l'amortissement atteint environ 50 ans. Il faut dire que l'ancien éclairage a de toute façon dû être remplacé, le bâtiment ayant été totalement rénové. Le nouvel éclairage répond

*Tableau 7.6:
Calcul économique simple pour le remplacement de l'éclairage d'une halle industrielle.*

	Ancien éclairage	Nouvel éclairage
Utilisation	Halle industrielle	
Surface	7000 m ²	
Nombre de luminaires	650	340
Puissance des luminaires	112,0 W	106,0 W
Puissance totale	72,8 kW	36,0 kW
Puissance spécifique	10,4 W/m ²	5,1 W/m ²
Heures à pleine charge annuelles	3200 h/a	3200 h/a
Consommation d'énergie annuelle	233 MWh/a	115 MWh/a
Prix de l'énergie	150 CHF/m ²	150 CHF/m ²
Coûts annuels de l'énergie	34 944 CHF/a	17 299 CHF/a
Économie sur les coûts d'énergie		17 645 CHF/a
Investissement		80 000 CHF
Coûts d'investissement spécifiques		11.40 CHF/m ²
Durée d'amortissement		4,5 ans

*Tableau 7.7:
Calcul économique simple pour le remplacement de l'éclairage d'un bâtiment scolaire.*

	Ancien éclairage	Nouvel éclairage
Utilisation	Bâtiment scolaire	
Surface	5000 m ²	
Nombre de luminaires	720	600
Puissance des luminaires	78,0 W	50,0 W
Puissance totale	56,2 kW	30,0 kW
Puissance spécifique	11,2 W/m ²	6,0 W/m ²
Heures à pleine charge annuelles	1500 h/a	1000 h/a
Consommation d'énergie annuelle	84 MWh/a	30 MWh/a
Prix de l'énergie	150 CHF/m ²	150 CHF/m ²
Coûts annuels de l'énergie	12 636 CHF/a	4500 CHF
Économie sur les coûts d'énergie		8136 CHF
Investissement		400 000 CHF
Coûts d'investissement spécifiques		80 CHF/m ²
Durée d'amortissement		49,2 ans

aux exigences les plus élevées en termes de qualité d'éclairage et est régulé en continu en fonction de la présence et de la lumière du jour.

Les exemples illustrent de manière évidente les grandes différences dans les coûts d'investissement d'un nouveau système d'éclairage. Ces coûts se situent entre CHF 10 et 80 par mètre carré (luminaires, planification et installation). Des valeurs de CHF 5 ou 200 sont également possibles.

7.7 Économies potentielles en éclairage

La consommation d'électricité pour l'éclairage des bâtiments a augmenté jusqu'en l'an 2000 et a légèrement diminué depuis l'introduction de la technologie LED. La consommation devrait diminuer de manière significative dans les prochaines années, une fois que la technologie LED aura atteint sa maturité sur le marché et que le potentiel offert par la technologie des capteurs sera disponible. Cette réduction se produira en partie d'elle-même (principalement grâce à l'augmentation généralement forte de l'efficacité des luminaires et

des lampes). L'exploitation de ce potentiel peut être nettement renforcée grâce à des mesures de soutien (en particulier dans les domaines de la planification, de l'utilisation de la lumière du jour et la technologie des capteurs). Dans une déclaration d'intention, les principaux acteurs du marché de l'éclairage et l'Office fédéral de l'énergie ont signé une charte, à Davos en 2018, dans le but de réduire de moitié la consommation d'énergie pour l'éclairage au cours des 7 prochaines années (Illustration 7.33). Sous la direction de l'Association Suisse pour l'éclairage (SLG), un concept détaillé a ensuite été élaboré, qui décrit les mesures nécessaires et la coopération des différents participants. Les mesures techniques et de communication sont divisées en quatre domaines prioritaires:

■ **Lampes et luminaires efficaces:** Actuellement, l'efficacité énergétique moyenne des luminaires certifiés Minergie est déjà supérieure de plus de 70 % à celle de 2009. Dans les prochaines années, la tendance va diminuer pour atteindre une certaine saturation. Les mêmes exigences ne s'appliquent pas partout et tous les produits efficaces ne sont pas forcément de

LICHT-VEREINBARUNG VON DAVOS

Im Jahr 2017 wurden in der Schweiz 58.3 TWh elektrische Energie konsumiert. Davon wurden 7 TWh, das heisst rund 12%, für die Lichtinstallationen benötigt. Die Licht-Branche ist überzeugt, dass aufgrund von neuen Technologien ein substantieller Teil davon eingespart werden könnte und möchte ihren Teil zur Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 beitragen.

Die beteiligten Organisationen verpflichten sich, per 2025 den Anteil der Beleuchtung am Gesamtstromverbrauch in der Schweiz auf 6% zu halbieren.

Participating organizations: Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie, SLG, Schweizer Licht Berufsgesellschaft, fvb, SCS NORM, MINERGIE, OTTO FISCHER, RELUX, SAFFE, ABTIE, EM, IKEA, VSEI USIE.

Illustration 7.33: Accord de Davos sur la lumière.

haute qualité. C'est pourquoi il est très important de disposer d'informations ciblées sur le choix optimal des luminaires et des lampes.

■ **Utilisation de capteurs:** Le développement des capteurs est un très grand levier dans la technologie LED (régulation selon la présence et la lumière du jour). Ce qui n'a pas fonctionné de manière optimale avec les sources lumineuses précédentes ne pose aucun problème avec les LED. Cependant, de nombreux planificateurs manquent de connaissances suffisantes, d'exemples bien documentés et, dans une certaine mesure, d'un choix de différents capteurs.

■ **Utilisation optimale de la lumière du jour:** Une meilleure utilisation de la lumière du jour réduirait non seulement la quantité d'énergie utilisée pour l'éclairage artificiel, mais apporterait également une contribution importante au domaine de la santé publique. Il manque un «lobby» dans le domaine de la lumière du jour, malgré son énorme importance. Le potentiel d'efficacité de l'éclairage peut être exploité par une bonne combinaison de luminaires performants, de capteurs de lumière naturelle et d'une utilisation optimale de la lumière du jour, également par de bonnes mesures de protection solaire.

■ **Une planification plus précise:** La «lumière digitale» (LED et capteurs sont les enfants du monde digital) exige une meilleure planification qu'auparavant. Les sys-

tèmes d'éclairage surdimensionnés et les commandes d'éclairage non fonctionnelles s'expliquent pour moitié dans le monde stagnant des lampes fluorescentes et halogènes. Dans le monde des LED, un dimensionnement et un contrôle précis sont possibles et nécessaires. Dans ce domaine, le potentiel est également important.

Si toutes les mesures sont prises ensemble, deux scénarios sont possibles pour la réduction de l'éclairage. L'illustration 7.34 montre l'évolution de la consommation avec et sans mesures d'accompagnement – celles-ci étant indispensables dans les domaines de la technique des capteurs, de la lumière du jour et de la planification. Sans aucune incitation, la consommation d'énergie pour l'éclairage pourrait passer d'environ 7 TWh/a aujourd'hui à environ 4,5 TWh/a d'ici 2050, voire à environ 2 TWh/a dans le futur, avec des mesures d'accompagnement. L'objectif de l'accord de Davos est de 3,5 TWh/a d'ici 2025 – c'est très ambitieux et techniquement réalisable – tout dépend de la volonté pour sa mise en œuvre.

En tout état de cause, on peut affirmer que dans aucun autre domaine de l'électricité, on peut économiser une telle quantité d'énergie avec aussi peu d'efforts.

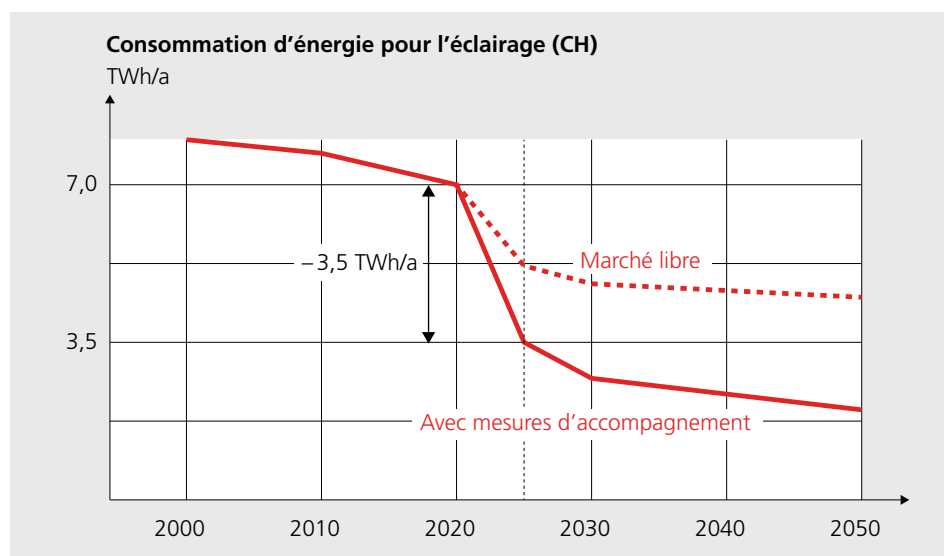


Illustration 7.34:
Courbe de l'éclairage, avec et sans mesure d'accompagnement.

7.8 Utilisation de l'obscurité

Les zones limites du spectre visible sont problématiques. Une trop grande exposition aux UV et aux infrarouges peut être nocive. De trop fortes intensités lumineuses (laser) ou certains spectres peuvent endommager la rétine. Dans ce contexte, la lumière peut causer des dégâts si elle est mal utilisée. Mais à quoi cela ressemble-t-il dans l'obscurité, la nuit? Nous transformons de plus en plus la nuit en jour, nous mutons vers une société éveillée de 24 heures. Depuis les années 1950, le sommeil naturel a été réduit d'environ 2 heures. Nous ne sommes plus reposés, nous vivons au-delà des possibilités de notre organisme, nous lui accordons, ainsi qu'à nos yeux et donc à notre cerveau, de moins en moins de repos tout en lui imposant un surrégime visuel. Il serait donc souhaitable de vraiment laisser la nuit sombre, de rendre de nouveau le ciel étoilé visible et pour cela de protéger le sommeil. Nous ne percevons plus le ciel comme cela est peut-être encore possible n'importe où au centre de l'Australie ou du Sahara. Les luminances de l'environnement sont pour la plupart si grandes que les étoiles sont tout simplement masquées.

Pollution lumineuse

Les effets de la lumière artificielle sur l'environnement ont déjà fait l'objet de débats ces dernières années. La problématique est que la lumière est utilisée avec excès et que ses effets perturbent de plus en plus l'environnement. Comme pollution lumineuse (de l'anglais light pollution), on désigne l'éclaircissement artificiel du ciel nocturne et l'effet perturbateur de la lumière sur les humains et la nature.

Sur les enregistrements des satellites de la Nasa, on peut bien identifier la lumière diffuse émise dans le ciel nocturne. Dans les centres des grandes agglomérations d'Europe, la pollution lumineuse est très prononcée, surtout en Grande-Bretagne, en Allemagne et en Italie, et la Suisse en pâtit également.

Pour les éclairages extérieurs, l'organisation Dark Sky formule des règles qui aident accessoirement à économiser de l'électricité:

■ **Règle n° 1:** Se demander si, pour chaque éclairage effectué à l'extérieur, celui-ci est vraiment nécessaire.

■ **Règle n° 2:** Eclairer de haut en bas. Ainsi, on évite que la lumière ne soit diffusée dans l'atmosphère.

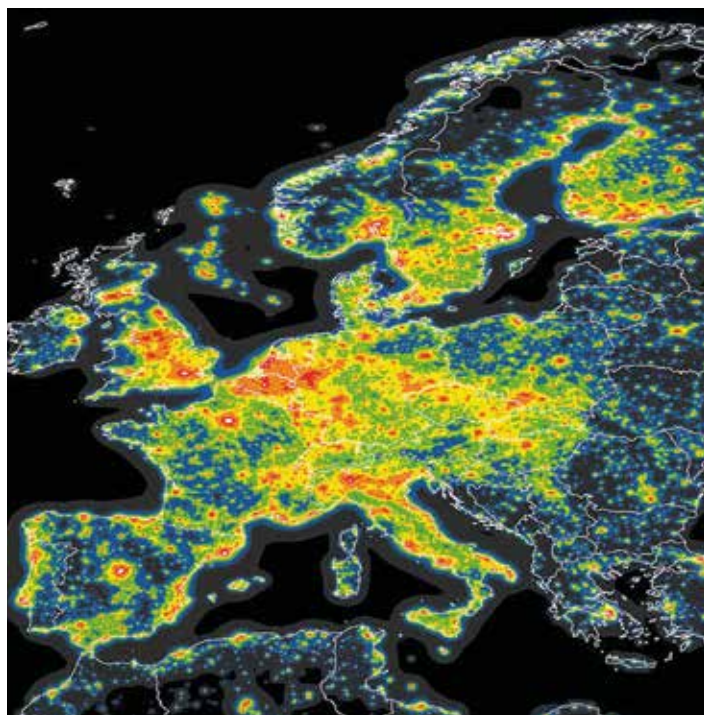
■ **Règle n° 3:** Veiller à ce que les lampes soient masquées. Ce qui est optimal c'est que le corps éclairant ne soit pas visible.

■ **Règle n° 4:** Choisir l'éclairage lumineux correct. Veiller à ce que le type d'éclairage soit adapté à la situation.

■ **Règle n° 5:** Le moins de lampes possibles doivent rester allumées toute la nuit. Limiter judicieusement la durée d'éclairage dans le temps.

*Illustration 7.35:
Pollution lumineuse
sur l'Europe.*

*Illustration 7.36:
L'obscurité devient
un bien de luxe,
également chez
nous.*



**L'obscurité devient
un bien de luxe.**

Etudes de cas

8.1 Ecole de Leutschenbach

Le lumineux centre d'apprentissage de Zurich

L'école de Leutschenbach est spectaculaire: au sein d'une construction d'acier en forme de tour, ceinturée de verre, les locaux sont disposés en couches les uns au-dessus des autres. Les couloirs des écoles traditionnelles n'existent plus ici. Cette école se conçoit comme atelier et laboratoire.

L'environnement est visible jusqu'au centre du bâtiment grâce au vitrage couvrant toute la surface de celui-ci. Les parois intérieures sont composées de verre Profilit moulé. Les locaux qui en sont entourés sont de différentes dimensions, largeurs et hauteurs, et constituent des développements différents du même concept architectural de l'espace. Les parois translu-

cides, laissant passer la lumière, séparent acoustiquement les locaux et permettent à la fois de subtiles liaisons optiques: La lumière du jour arrive jusqu'à l'intérieur du bâtiment et les mouvements des élèves se dessinent vaguement à travers le verre.

Les étages supérieurs sont tous éclairés avec un éclairage à grille anti-éblouissant. Le luminaire est intégré dans la zone supérieure du plafond en béton brut ondulé. Comme élément intégré dans le plafond, le tapis du luminaire est tissé avec la structure de base du bâtiment et disparaît dans la perspective. La trame de positionnement des luminaires est régulière sur toutes les zones, mais moins dense où l'éclairage lumineux est le plus faible.

L'ambiance lumineuse régulière et calme n'estompe pas la vue étendue sur l'environnement urbain. Aucune surface à luminance élevée ne gêne la perception dans le

Objet

Installation scolaire
Leutschenbach
Saatlenfussweg 3,
Zurich-Schwamendingen

Maître d'ouvrage

Ville de Zurich,
Amt für Hochbauten

Architecte

Christian Kerez AG
8045 Zurich

Concepteur d'éclairage

Amstein + Walthert
8050 Zurich

*Illustration 8.1:
Le bâtiment scolaire
Leutschenbach avec
étage sur fondations,
trois étages
avec salles de
classes, étage avec
bibliothèque et médiathèque ainsi
qu'une salle de
gymnastique.*



bâtiment. Et, comme posée sur un nuage de lumière diffus, l'école semble flotter. Dans le crépuscule, elle éclaire telle une gigantesque lanterne au-dessus du nouveau quartier de Leutschenbach. L'union de la complexité de la structure avec l'éclairage ne pouvait pas être intentionnelle. L'augmentation des hauteurs d'étage en revanche, cette dissolution de la pression au rez-de-chaussée vers le haut, la tentative de montrer cette évi-

dence de l'utilisation et de la formation au moyen d'un éclairage homogène sont fascinantes. Aucune séparation des niveaux inférieurs et supérieurs, des lampes homogènes, des luminaires anti-éblouissants, des aspects Minergie, un espace de projet, etc. étaient les thèmes du terrain de jeu favori: La lumière. Le retrait des luminaires par un dispositif anti-éblouissement et une intégration dans la partie supérieure du plafond en béton brut ondulé donne une

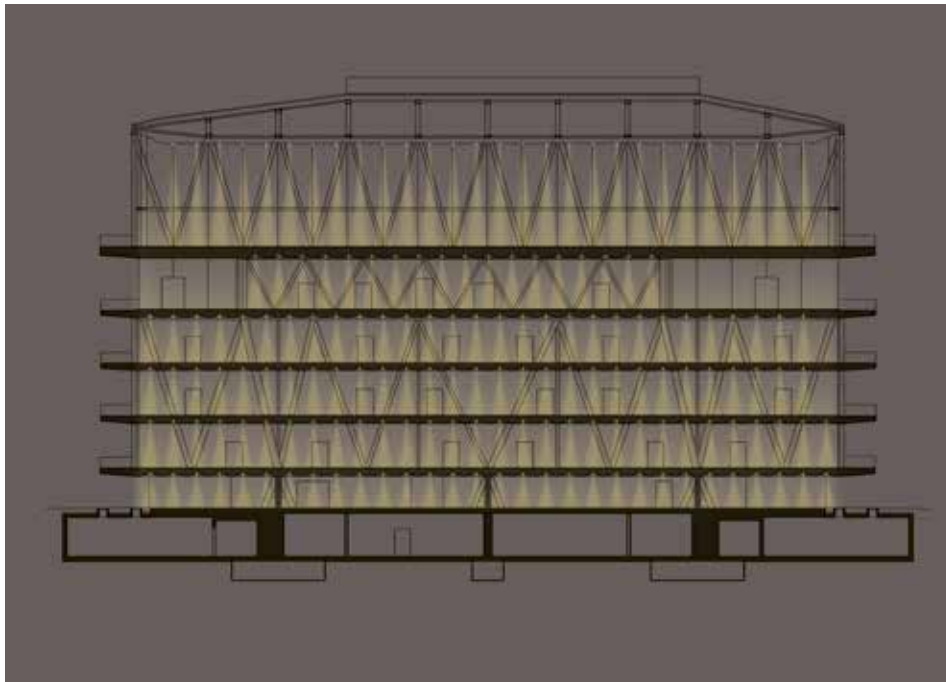


Illustration 8.2:
Coupe à travers le
bâtiment scolaire
Leutschenbach.

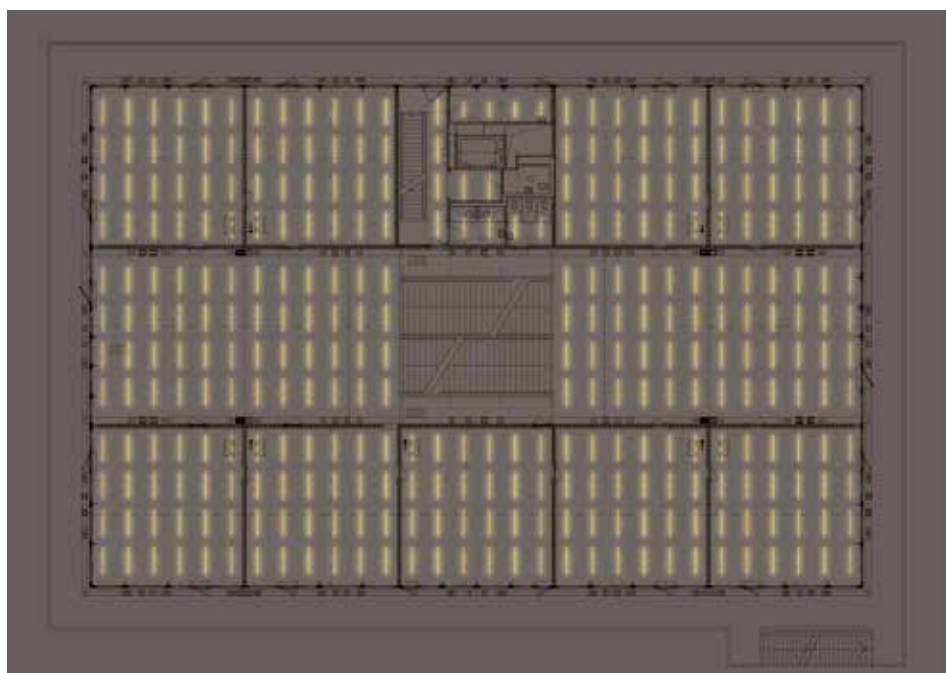


Illustration 8.3:
Plan d'ensemble 1^{er}
étage, bâtiment
scolaire Leutschen-
bach, avec les posi-
tions des lumi-
naires.

allure cristalline et uniforme au bâtiment tant par ses matériaux que par l'éclairage. Des contradictions qui se retrouvent également dans l'éclairage et la statique et qui cohabitent malgré tout. Le niveau élevé de lumière uniforme permet, également dans la zone de circulation, de tenir des classes.

Description du projet

Sous la responsabilité du département des Travaux publics de la ville de Zurich, une procédure d'appel d'offres a été lancée en deux phases pour la rénovation d'une école d'enseignement primaire et secondaire et le bureau d'architectes Christian Kerez l'a emporté. Avec au total 22 salles de classe, une double salle de sport, une médiathèque, une bibliothèque, une salle polyvalente, une cantine, une garderie et une série d'ateliers et de salles spécialisées, c'est le deuxième plus grand bâtiment scolaire de la ville (après l'école de Birch). Christian Kerez avait convaincu le jury avec un concept inhabituel: Tandis que dans le vaste programme des salles, les volumes étaient séparés individuellement et placés les uns à côté des autres, il a condensé ici un corps de bâtiment compact, de sorte à affecter le moins possible la surface libre du nouveau parc ouvert Andreas, situé entre Andreasstrasse et Hagenholzstrasse. Grâce à ses 30 m de haut, le bâtiment est en harmonie avec les immeubles voisins. Ce qui est en opposition avec l'urbanisation morcelée d'après-guerre à Schwamendingen et se pose comme un nouveau départ dans l'urbanisation du nord de Zurich.

La superposition de tous les locaux dans un seul bâtiment est inhabituelle, mais l'agencement des zones d'utilisation ne l'est pas moins. La double salle de sport, la plupart du temps située de plain-pied ou en sous-sol, occupe ici le dernier niveau du bâtiment. Construire un local sans appuis, dans des dimensions prédéfinies en lui superposant d'autres étages, aurait causé des problèmes de transfert de charges. Par conséquent, l'architecte et le concepteur de la structure se sont décidés pour la solution inverse. Le quatrième étage, formé comme une construction à colombages en

retrait derrière les façades et dont la charge est introduite, via six appuis, dans la branche en béton du sous-sol, forme le cœur statique du bâtiment. La salle de sport est posée au quatrième étage comme sur une table. En même temps, les trois niveaux de l'école, construits en charpente d'acier, sont détachés de ce dernier niveau. Il en résulte une rythmique et une différenciation fonctionnelle du volume: Le niveau du rez-de-chaussée et de l'entrée avec la cantine et le club des élèves est plaqué d'un bloc de trois niveaux de classes, le quatrième étage avec salle polyvalente, bibliothèque et médiathèque est doublé d'une salle de sport de proportions approximativement égales.

L'escalier non encloisonné au milieu permet des connexions courtes et séparées pour les niveaux du primaire et du secondaire. Les salles de classe elles-mêmes, de plan approximativement carré, sont parallèles aux faces longitudinales Nord et Sud. Les zones entourées par les escaliers sont utilisées pour les classes de projet et de groupes, avec des concepts pédagogiques actuels. Les couloirs en tant que zone de dégagement n'existent pas dans le bâtiment scolaire de Leutschenbach. Les aires de balcon situées tout autour du bâtiment occupent une fonction multiple: Elles peuvent être utilisées comme issues de secours, ont la fonction d'éléments d'ombrage, servent également de lieux de détente, soutenant ainsi une utilisation flexible de l'espace. Enfin, Christian Kerez emprunte de nouvelles voies lors du choix des matériaux également. A part les

Caractéristiques de l'éclairage

L'éclairage a été planifié sur la base des directives sur les installations techniques du bâtiment, des directives sur les bâtiments scolaires AHB, des directives BASPO et de la norme SN/EN 12464-1 avec un facteur de maintenance 0,8.

Achèvement	2009
Surface éclairée	9 220 m ²
Besoin d'énergie pour l'éclairage	73 MWh/a
Valeur du projet éclairage	7,9 kWh/m ²
Certification Minergie	2009

Caractéristiques des coûts

CFC 233 luminaires et lampes	600 000 CHF
------------------------------	-------------

noyaux de l'escalier et le sous-sol (avec salles de travail et zones techniques), il n'y a pas de murs opaques classiques. La délimitation des classes entre elles et des lieux de détente au milieu du bâtiment est donnée par des constructions en verre industriel translucide, qu'on appelle Profilit. Ce qui a donné naissance à un paysage éducatif urbain à caractère d'atelier à l'aspect informel, au-delà du caractère renfermé des salles de classe traditionnelles. Et dans le crépuscule, le bâtiment scolaire éclaire de l'intérieur comme une lanterne géante sur le nouveau quartier de Leutschenbach. (Source: Département des Travaux publics de la ville de Zurich)



Illustration 8.4:
Rez-de-chaussée.



Illustration 8.5:
Vue depuis la salle de gymnastique.

8.2 Centre des congrès de Davos

Ensemble fait de bois, de béton et de lumière

L'entrée principale du Centre des congrès donnant sur la Talstrasse crée de l'espace pour un large passage et un accès digne. Le geste d'invitation du toit incliné qui s'étend jusque dans la zone de réception a été dessiné avec des luminaires individuels placés en rangs. Les rails lumineux de l'auvent se prolongent dans l'espace intérieur et lient les structures de la pièce par une pellicule de séparation transparente. L'ambiance lumineuse diffuse générée par les luminaires à rayonnement libre s'étend dans la salle allongée des pas perdus, adjacente. Dans la perspective, le plafond devient une surface éclairée grâce aux surfaces claires de la pièce et à l'ajout de lumi-

nares. En complément de cet éclairage de base, des downlights sont placés entre les rails lumineux. Le positionnement irrégulier des downlights alterne avec la rigidité des rails lumineux. Les dominantes lumineuses librement placées contrastent avec l'éclairage diffus régulier. Le mur continu de la salle des pas perdus peut être éclairé avec des spots réflecteurs muraux pour les expositions. Ce panneau massif s'ouvre sur la zone de l'ancienne scène du nouveau foyer, l'ancienne grande salle de Ernst Gisel. Dans ce secteur, le concept lumineux existant a également été conservé. En montant le large escalier et en traversant le foyer, on arrive dans la nouvelle grande salle surplombée par un imposant toit en forme de nid d'abeille, semblable à la structure d'un pont. Les alvéoles à la lumière claire donnent à la construction du toit une impression d'ape-

Objet

Extension de la construction
Centre des congrès
Davos
7270 Davos Platz

Maître d'ouvrage

Landschaft Davos
Gemeinde

Architecte

Degelo Architekten
4052 Bâle

Concepteur d'éclairage

Amstein + Walthert
8050 Zurich

*Illustration 8.6:
La nouvelle salle
plénière du Centre
des congrès de
Davos.*



santeur, les nervures servant d'ornement décoratif flottant. Sous le niveau des nervures, les points lumineux sont suspendus, octroyant un côté mystique à la pièce semblable à un ciel étoilé.

Le type de construction et d'installation ont été réduits au minimum pour tous les luminaires. Les luminaires fluorescents à rayonnement libre sont montés sans rebord au niveau du plafond. Seule la lampe sort du plafond. Dans les salles de conférence, ces luminaires sont complétés par une grille blanche, pour garantir un anti-éblouissement nécessaire en rapport avec l'utilisation des salles. L'effet de «lumière sortant d'un orifice» a été recherché pour les downlights à rayonnement étroit, immergés dans le plafond. Les points lumineux en filigrane de la grande salle sont disposés comme des bâtons suspendus avec des lampes halogènes à basse tension. L'idée de départ, de réaliser ces luminaires dans la technologie LED, a été abandonnée au cours de la conception en raison de l'émission électromagnétique parasite et de la perturbation de l'installation anti-écoute des interprètes. Tous les luminaires sont réalisés de manière réglable et sont intégrés dans différents scénarios lumineux préprogrammés qui permettent de mettre en scène la salle, du clair sans ombre jusqu'au dynamique dramatique,

selon l'heure de la journée et l'occasion. Au défi de répondre au plus grand nombre d'exigences des utilisateurs et de concilier différentes ambiances lumineuses, une solution lumineuse particulière a été trouvée, au fil des réflexions sur les locaux et avec les architectes. Le cadre financier, les éclairages lumineux verticaux pour garantir le confort visuel dans les zones de circulation, l'atmosphère festive, le caractère hétéroclite et la polyvalence ont dû être satisfaits. Le résultat montre l'effort considérable réalisé pour répondre à toutes ces exigences. Avec le recul, il semble y avoir une logique claire. Le processus qui conduit à cela comporte toujours une optimisation plus ou moins onéreuse. Les impressions voulues se superposent avec des effets surprenants. Un tel ouvrage renferme toujours plus de surprises que ce qui était prévu.

Un nouvel emblème pour Davos

Davos possède une longue tradition dans le domaine de l'accueil de congrès. En 1928, Einstein inaugure les cours universitaires de Davos, qui y ont drainé l'élite intellectuelle d'Europe. A la fin des années 1950, les premiers congrès de médecine y ont lieu. Les habitants de Davos, adoptant une vision à long terme, décident en 1967 de construire un bâtiment des congrès qui

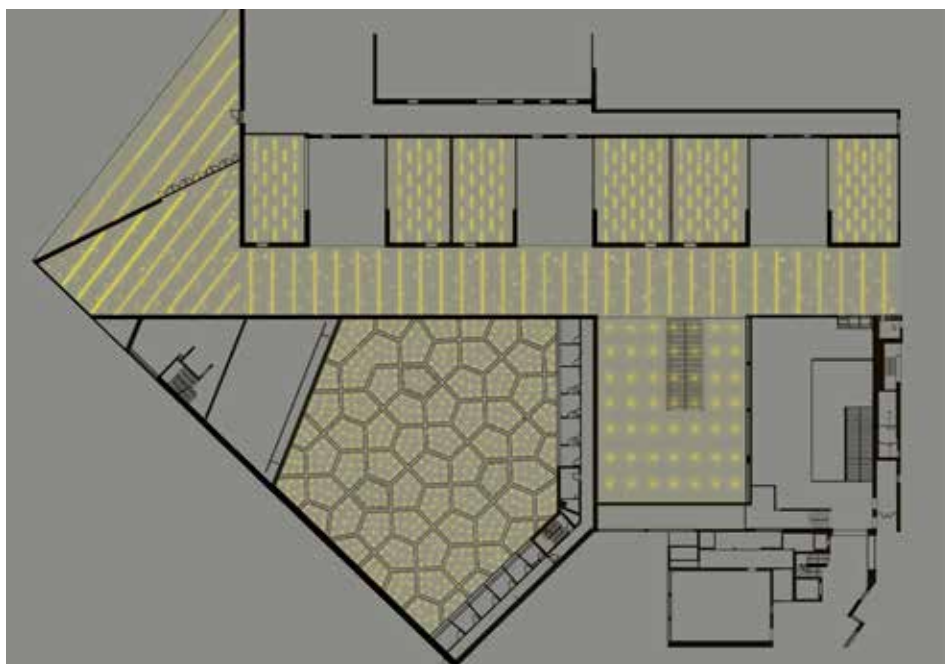


Illustration 8.7: Plan d'étage au niveau du parc.



*Illustration 8.8:
Nouvel accès au
Centre des congrès
de Davos.*



*Illustration 8.9:
Hall d'entrée avec
vue sur la salle des
pas perdus du
Centre des congrès
de Davos.*

est progressivement élargi pour devenir le Centre des congrès. En 2008, les architectes Degelo, basés à Bâle, remportent le concours pour l'extension du Centre des congrès grâce auquel Davos peut consolider sa position en tant que premier site d'accueil des congrès des Alpes.

L'architecture, reflet de l'importance internationale

L'extension du Centre des congrès de Davos permet de réunir les différentes parties du complexe, créant ainsi une unité intégrée dans le large parc. L'entrée principale a été déplacée à la Talstrasse pour créer une entrée large et digne du Centre des congrès. L'ancienne grande salle d'Ernst Gisel forme le vrai point de départ de l'extension.

Comme foyer de la nouvelle salle des congrès, une utilisation adaptée lui a été attribuée, lui permettant de conserver sa qualité. Le principe d'un accès élevé autour du bâtiment et d'une salle située en contre-bas a été repris. A partir du niveau inférieur du foyer, on pénètre dans la nouvelle salle avec une géométrie de plan optimale. Le Centre des congrès fonctionne aussi bien en tant qu'unité ayant une zone d'entrée performante pour les grands évé-

nements qu'en tant que trois parties autonomes qui peuvent être exploitées séparément et indépendamment les unes des autres. Le recouvrement en mélèze et en béton brut contribue à la fusion du bâtiment en un ensemble. Ainsi, l'importance internationale du bâtiment se reflète également dans son apparence extérieure.

Caractéristiques de l'éclairage

L'éclairage a été planifié sur la base SN EN 12464-1 avec un facteur de maintenance de 0,8.

Salle des pas perdus et réception	
Eclairage lumineux Em	450 lux
Surface	1100 m ²
Luminaires fluorescents 82 x 31 W + 160 x 39 W = 8782 W	
Luminaires halogènes 152 x 38,5 W = 5852 W	
Correspond à	13 W/m ²
Salle	
Eclairage lumineux Em	300 lux
Surface	1390 m ²
Luminaires halogènes 307 x 10 W = 3070 W	
Luminaires suspendus 750 x 26 W = 19500 W	
Luminaires fluorescents 25 x 39 W = 975 W	
Correspond à	17 W/m ²

Caractéristiques des coûts

CFC 233 luminaires et lampes	780 000 CHF
Achèvement	2010

8.3 Technorama de Winterthour

Un fil rouge traverse le bâtiment

Faire de nécessité vertu est le maître mot pour la rénovation du bâtiment. C'est ainsi que l'on pourrait désigner le processus de conception du Technorama de Winterthour. Les intentions et les conditions du côté du maître d'ouvrage et des architectes ont été rapidement formulées. La pression des prix était grande. L'idée de n'avoir pour une fois aucun luminaire dans le plafond a rapidement conduit, avec le choix des matériaux, à les intégrer dans les murs. D'un côté, le rythme était clairement affiché et la technique sous-jacente certes visible, mais c'est justement cet aspect qui était voulu dans le Technorama.

Illustration 8.10: Effet lumineux de la lampe fluorescente intégrée dans la couche intermédiaire vers l'intérieur et vers l'extérieur.

Les matériaux choisis pour l'aménagement s'inspirent de la simplicité et de la discrétion de ceux du bâtiment existant et ont assimilé son caractère industriel. La structure portante du couloir du foyer est en béton tandis que ses façades sont recouvertes d'éléments de scobalites translucides, placés en couches. L'entrée dans ce canal servant d'auvent s'effectue progressivement: L'extrémité extérieure est équipée d'un volet roulant tandis qu'un rideau métallique en matière synthétique blanc et transparent, placé en retrait et enrroulable latéralement, ainsi qu'un écran thermique servant de SAS, garantissent l'entrée proprement dite dans le bâtiment. Les revêtements latéraux de la rampe de livraison sont en plaques d'éléments lumineux en scobalite. Ce jeu de matériaux et la pré-

Objet

Nouvel aménagement entrée et restaurant, Technorama, Winterthour

Maître d'ouvrage

Stiftung Technorama, Winterthour

Architectes, direction des travaux

Dürig & Rämi AG
8004 Zurich

Concepteur d'éclairage

Amstein + Walther
8050 Zurich



sentation de la technologie est une thématique qui correspond à l'objectif du Technorama. C'est également une tentative de produire le plus grand effet avec des moyens minimalistes. Toutes les mesures sont simples et ont été élaborées en collaboration avec les architectes. Il s'agit de plaques en scobalite rétro-éclairées, d'objets de pièce éclairés en dessous, de supports de vestiaires surélevés. Toutes ces mesures, qui ont un effet faible ou important, font naître ensemble quelque chose de nouveau et de compréhensible qui aurait toujours pu exister comme tel.

Les illustrations montrent la façade en plaques ondulées lumineuses translucides dans l'espace du canal d'entrée, rétro-éclairées avec des lampes fluorescentes, dont la lumière se reflète sur le sol rouge en résine époxy. Les parois des zones de caisses sont équipées de lampes fluorescentes, dont la lumière colorée se reflète sur le plafond descendu en panneaux de métal déployé et sur le sol.

Analyse

Le Technorama de Winterthur a été conçu de 1975 à 1979 et inauguré en 1982. Le musée, qui est en termes d'expositions permanentes le plus visité de Suisse avec 250 000 visiteurs par an, compte parmi les plus grands parcs scientifiques du monde, dans lequel les visiteurs peuvent faire des expériences directes avec des phénomènes naturels et technologiques à l'aide d'expérimentations de type ludo-éducatif. Son nombre constamment croissant de visiteurs (a doublé entre 1993 et 1999! jusqu'à 3000 visiteurs les dimanches pluvieux!) a rendu urgente la nécessité de rénover son hall d'entrée et d'adapter l'infrastructure pour les visiteurs, c'est donc au printemps 2000 qu'un appel d'offres a été lancé pour les modifications architec-

turales. Le marché a été remporté par Dürig & Rämi qui se sont vu confier la conception des aménagements.

Les bâtiments des années 1960 et 1970 n'ont pas bonne réputation en général, car on les associe souvent à une rationalité et à une fonctionnalité surbétonnée et exagérée et on leur prête généralement des défauts dans la technique de construction, car ils sont nés dans l'urgence de la forte conjoncture d'après-guerre. Le Technorama est apparu avant le boom des musées des années 1980 et ressemble plus à un bâtiment industriel réaliste et sobre qu'à un musée.

Sa construction est toutefois solide et il remplit sa fonction de lieu d'expositions du Technorama. Par conséquent, les interventions proposées par les architectes se sont limitées au minimum à la zone d'entrée, au restaurant, à l'orientation à l'intérieur du bâtiment ainsi qu'à la relation fonctionnelle et spatiale du bâtiment avec les pièces extérieures.

Une mesure architecturale, minimale mais précise, ainsi que le transfert du restaurant de sa position centrale vers une position périphérique, ont résolu une fois pour toutes les problèmes fonctionnels d'infrastructure autour de l'entrée du Technorama: Un nouveau couloir tout en longueur et traversant sert d'axe de cloisonnement central. La solution compliquée de l'entrée avant les aménagements a été résolue par un transfert de surface habile et intelligent grâce au déplacement du restaurant. La conséquence est une clarification des espaces de part et d'autre du couloir central: D'un côté l'entrée avec vestiaire et boutique, de l'autre la cage d'escalier et le restaurant. Le couloir au centre permet de nombreuses connexions spatiales et des rapports visuels sur les locaux situés sur la longueur. Il relie le parvis de la zone d'entrée à la sortie arrière donnant sur le parc. Il fait à la fois office de foyer, d'entrée, de salle de détente, de lieu de circulation, d'aide à l'orientation et de repère comme point de rencontre. Ce qui donne au Technorama un nouveau centre, placé au milieu, comme signe reconnaissable et attractif qui, avec son sol en résine

Caractéristiques de l'éclairage

Surface de référence énergétique (SRE)	1121 m ²
Valeur de mesure de l'éclairement lumineux	275 lux
Consommation d'énergie éclairage	10,21 kWh/m ² a

Caractéristiques des coûts

CFC 23 installations électriques	626232 CHF
----------------------------------	------------

époxy coloré en rouge, constitue à la fois un plaisant signe de bienvenue pour les visiteurs et une excellente caractéristique du nouveau Technorama. Le tapis rouge continue à se dérouler sous forme de gazon synthétique rouge sur la cour intérieure proche qui éclaire le nouveau couloir central avec son large vitrage entre les deux noyaux de communication et entre les étages. La cour intérieure devient ainsi une extension spatiale sur les trois niveaux du couloir central.

Le tapis rouge se déroule également dans la zone de vestiaire située sur la gauche du foyer et la boutique (shop) ainsi que dans la cour intérieure en face. Le positionnement central du couloir du foyer permet de multiples liaisons spatiales et des relations visuelles avec la zone vestiaire-caisse, la boutique, les salles d'exposition et la cour. Avec sa zone jardin située à l'extérieur, le restaurant, réalisé par le bureau d'architectes Klaus établi à Mettmenssteden, se trouve à droite de l'entrée, en périphérie du côté exposé au soleil.



*Illustration 8.11:
Nouveau couloir
central de distribu-
tion dans le Techno-
rama.*



*Illustration 8.12:
Caisse supplémen-
taire dans le hall
d'entrée.*

L'espace rouge du foyer relie les deux cages d'escalier existantes à un système de cloisonnement interne, fonctionnant bien, créant une vue attractive entre l'entrée et le parc situé à l'arrière.

Le couloir du foyer jaillit métaphoriquement du corps du bâtiment aux deux extrémités, jalonnant le parvis d'entrée ainsi que la sortie du côté du parc. Il relie ainsi les espaces extérieurs centraux du Technorama: Parvis, cour intérieure et accès arrière vers le parc.

Le tapis rouge se déroule également dans la zone de vestiaire située sur la gauche du foyer et de la boutique (shop) ainsi que dans la cour intérieure en face. Le positionnement central du couloir du foyer permet de multiples liaisons spatiales et des relations visuelles avec la zone vestiaire-caisse, la boutique, les salles d'exposition et la cour.

Bases

Grâce à une intervention minimale sur le volume et l'infrastructure, les modifications extérieures apportées au bâtiment sont limitées au minimum. Aucune modification déterminante ne s'impose non plus sur les façades, puisqu'elles satisfont pleinement aux exigences actuelles de la technologie d'éclairage et des protections contre les intempéries. Une rénovation complète des façades pourra être conçue de manière bien plus efficace, avec une meilleure isolation thermique, dans quelques années. La façade existante, en tôlerie industrielle or-noir brillant selon l'éclairage, ne doit pas non plus être modifiée, car elle est devenue la caractéristique extérieure incomparable du Technorama et sa discrétion indique l'importance et la signification du contenu du musée: C'est le contenu qui est la star et non l'enveloppe du bâtiment.

La façade d'entrée a été conçue par l'artiste américain Ned Kahn, originaire de Californie. Sa sculpture Wind Vail, qui signifie «voilure», est composée de 40 000 petits panneaux carrés d'aluminium qui oscillent librement dans un cadre en aluminium géant de 75 sur 15 m, placé au-dessus de la façade d'entrée. Les petites

plaques bougent au gré du vent, générant les réflexions de la lumière les plus diverses, semblables au reflet de la lumière dans de l'eau en mouvement. La conception de la façade d'entrée s'inspire du contenu ludophénoménologique des expositions se trouvant à l'intérieur du Technorama.

Avec sa simplicité et ses détails réalisés avec des matériaux bon marché et préfabriqués, l'aménagement du Technorama ne s'inspire pas uniquement du caractère industriel du bâtiment, mais reflète plutôt le caractère ludique expérimental et phénoménal des pièces exposées dans le parc scientifique. Les matériaux choisis jouent littéralement avec les effets lumineux et de reflet, les surfaces brillantes et les nuances fortes.

8.4 Bibliothèque cantonale de Liestal

Un phare pour les livres

Le sol et le mobilier jaune-vert forment un contrepoint volontaire avec les tons brun chaud de la structure porteuse en bois. Les lampes fluorescentes créent un tapis lumineux qui se pose uniformément sur les niveaux. En entrant dans le bâtiment, le visiteur plonge dans la lumière. En le quittant, il émerge de la lumière. Un effet qui est créé par la disposition asymétrique des plafonniers placés entre les vieilles poutres. Les lampes fluorescentes simples ne sont pas montées au milieu du rectangle de la structure primaire et secondaire des poutres, mais sur le bord. Ce qui donne lieu à un jeu de lumière révélant les luminaires en pénétrant dans le local, les révélant et les faisant disparaître dans l'ombre en quittant la pièce. Par ailleurs, dans un champ du plafond se dessine un trajet lumineux qui ancre l'orientation du local

dans l'inconscient de l'observateur. Cette thématique lumineuse a été empruntée au concept utilisé dans les églises par Rudolf Schwarz. Ce concept d'éclairage est d'une simplicité éblouissante: Des réglettes simples sont montées en une trame régulière dans le plafond, à chaque étage. La lumière douce et diffuse des lampes fluorescentes est répartie directement dans le local. Cette simple disposition permet d'obtenir une répartition lumineuse extrêmement homogène avec un éclairage lumineux vertical très élevé. L'analyse de la tâche visuelle et le compromis révélé ont permis de pondérer moins fortement le critère d'ergonomie: Les luminaires ouverts ne sont pas utilisés dans de nombreux cas, car ils peuvent éblouir l'observateur. La tâche visuelle dans la bibliothèque en libre accès a toutefois été définie par la recherche de livres et la lecture. Dans les deux cas, l'orientation du regard est parallèle ou plutôt inclinée vers le bas. Ainsi, l'œil se soustrait à la véritable problématique de l'éblouissement. Le résultat est

Objet

Bibliothèque cantonale de Bâle-Campagne
4410 Liestal

Maître d'ouvrage

Bau- und Umweltschutzdirektion
Kanton Basel-Landschaft, Hochbauamt
4410 Liestal

Architectes, direction de la construction

Liechti Graf
Zumsteg
5201 Brugg

Concepteur d'éclairage

Amstein + Walthert
8050 Zurich

*Illustration 8.13:
Vue de la bibliothèque cantonale au crépuscule.*



tant une répartition qu'un éclairage lumineux homogène. Les mesures effectuées sur les rayons de livres ont montré que la valeur moyenne calculée pour l'éclairage lumineux était largement dépassée de 200 lux.

Les niches vitrées sont éclairées le soir avec des luminaires supplémentaires intégrés sur le côté de la fenêtre. Un chemin lumineux sur le bord inférieur de la niche accentue la structure de la fenêtre en caisson la nuit. Dans l'obscurité, la structure de verre se transforme en phare rayonnant. Deux projecteurs de 150 W chacun éclairent le plafond blanc de sorte qu'aucun rayonnement direct n'arrive au dehors.

Grâce à la structure simple de la réglette sans diffuseur, un rendement calculé des luminaires entre 95 et 105 % a pu être atteint. Ceci était d'autant plus important que le maître d'ouvrage exigeait un éclairage lumineux de 300 lux, plus élevé que les 200 lux habituels. Par ailleurs, les plafonds en bois sombres ont rendu difficile la situation d'éclairage car ils reflétaient très peu de lumière. A cela s'ajoute le fait que très peu de lumière du jour arrivait à entrer dans les pièces par les étroites fenêtres en caisson. Tandis que les combles sont suffisamment clairs pendant la journée grâce à la structure de verre, le premier et le second étage doivent toujours être éclairés artificiellement. Malgré le patio, la lumière du jour descend peu du toit vers les étages inférieurs, car la lumière pénètre latéralement dans le lanterneau en verre. Le plafond de la structure de verre ne laisse pas passer la lumière.

Les premières simulations de la situation d'éclairage ont montré que l'intensité lumineuse requise de 300 lux ne pouvait pas être atteinte partout avec l'équipement prévu. L'installation de luminaires supplémentaires n'était pas possible puisque la consommation d'énergie autorisée conformément à Minergie était déjà atteinte avec l'équipement prévu.

Analyse

En 1998, la Direction des travaux et de la protection de l'environnement du canton de Bâle-Campagne a lancé un appel

d'offres dans le domaine de l'architecture. Lors de la rénovation du bâtiment historique, la structure porteuse et la forme du toit devaient être conservées. Le bureau d'architectes de Peggy Liechti, Andreas Grad et Lukas Zumsteg a opté dans l'appel d'offres pour un concept où l'ancien et le nouveau se fondraient dans un ensemble inséparable. La structure de verre relève la forme du toit déjà prononcée à l'origine. Les architectes ont habillé le bâtiment jusqu'au premier étage avec des tuiles plates écailles, faisant apparaître un corps de toit cubique agissant comme une coiffe posée sur la base. Les fenêtres en caisson

Illustration 8.14: Couloir (bibliothèque cantonale de Liestal).



Caractéristiques de l'éclairage

Surface de référence énergétique (SRE)	4028 m ²
Eclairage lumineux vertical requis	300 lux
Valeur de mesure de l'éclairage lumineux	300 lux

Consommation d'énergie éclairage

Valeur du projet	15,3 kWh/m ² a
Exigence Minergie	15,6 kWh/m ² a
Valeur cible SIA 380/4	12,8 kWh/m ² a
Valeur limite SIA 380/4	23,8 kWh/m ² a

Caractéristiques des coûts

CFC 233 luminaires et lampes	340000 CHF
------------------------------	------------

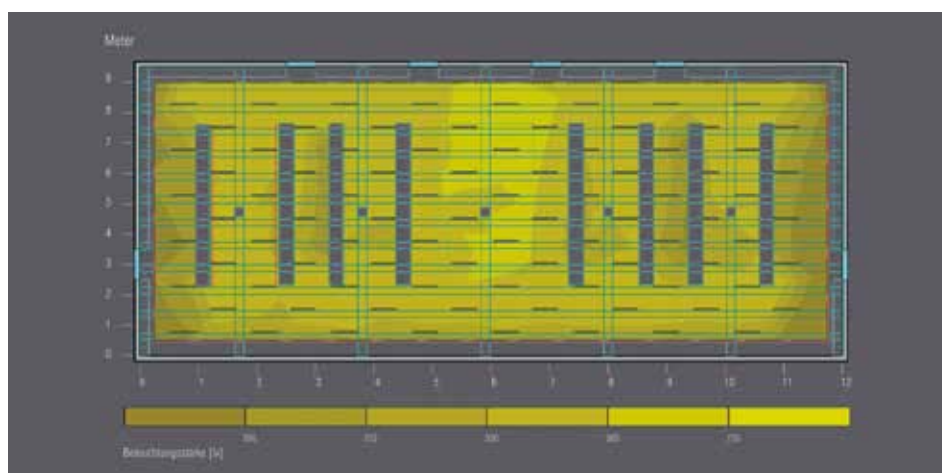


Illustration 8.15: Répartition de l'éclairage lumineux (bibliothèque cantonale, Liestal).



Illustration 8.16: Cafeteria dans la bibliothèque cantonale de Liestal.



Illustration 8.17: Service de prêt de la bibliothèque cantonale de Liestal.

composées de larges tôles de cuivre renforcent l'effet sculptural. Le socle du bâtiment est enduit de gris et s'ouvre sur la place avec sa grande fenêtre en longueur. A l'intérieur du bâtiment, le centre est un large patio qui relie les étages grâce à l'escalier principal et aux ascenseurs de verre. Au rez-de-chaussée, une cafétéria invite à faire une pause tandis qu'au premier étage, une terrasse offre un espace pour l'étude des livres. La bibliothèque en accès

libre propose 80 000 livres et supports sur quatre étages au total. Les étagères, situées autour de la structure porteuse en bois, dans les tons vert-jaune, sont en harmonie avec le reste du mobilier. Dans les niches vitrées, les espaces de lecture invitent le visiteur à se retirer avec des livres ou des magazines. Les deux niveaux inférieurs abritent l'entrepôt de livres et l'administration de la bibliothèque.

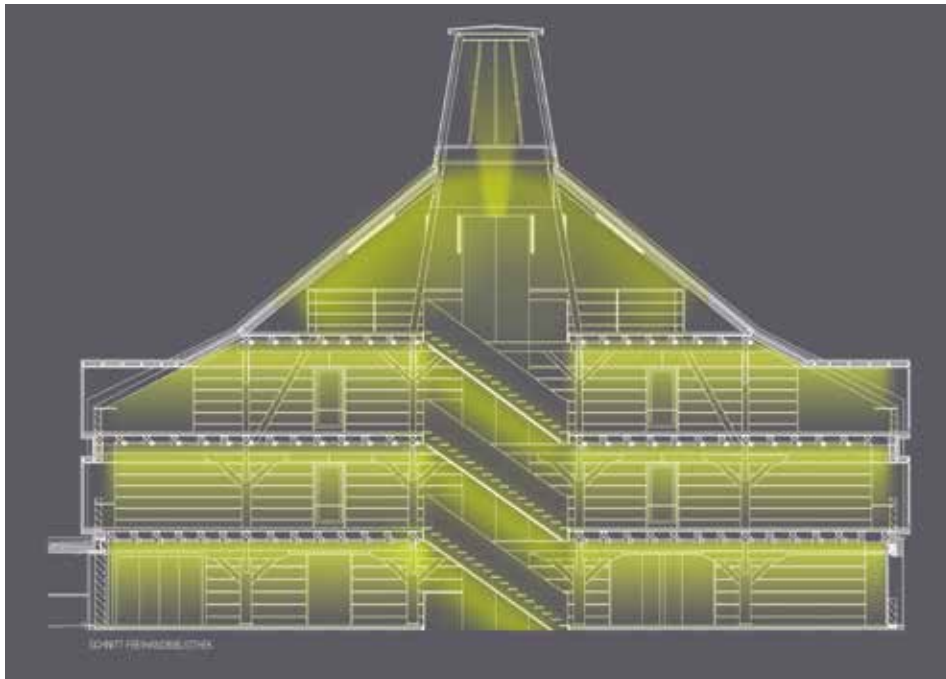


Illustration 8.18:
Coupe.

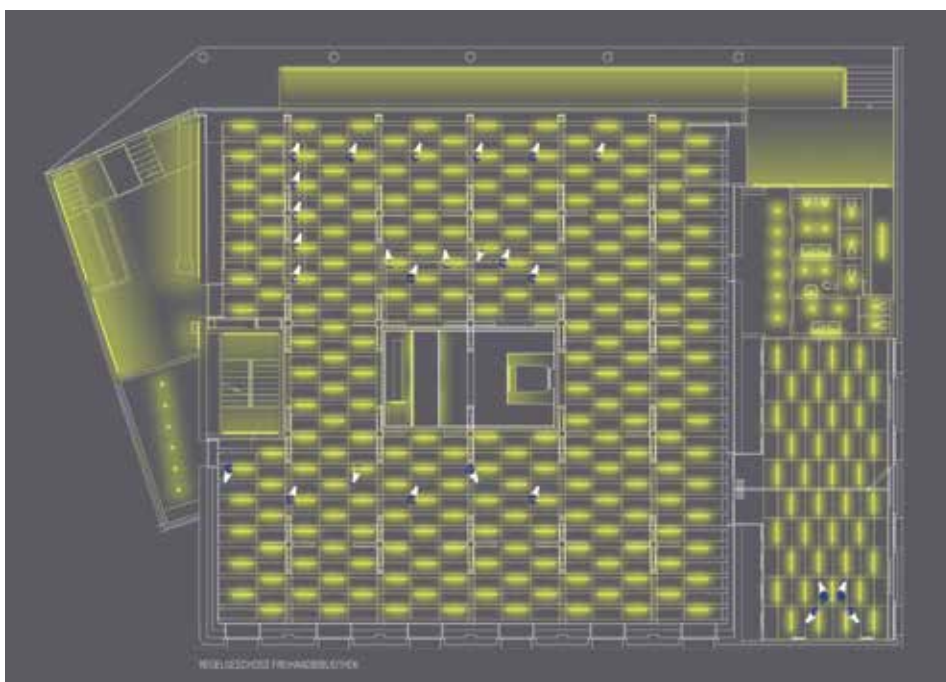


Illustration 8.19:
Plan du rez-de-chaussée.

8.5 Halle d'expositions Dornbirn

Monolithe rouge-noir

Qu'il s'agisse de foires aux arts ménagers, d'expositions d'art ou d'événements d'entreprise extravagants: Les halles d'exposition doivent remplir de nombreuses fonctions et accueillir toute une variété de manifestations. Elles doivent d'abord être fonctionnelles, mais aussi représenter quelque chose de spécial pour les distinguer face aux autres types de lieux. Afin d'organiser le développement de la halle d'expositions de Dornbirn de manière ordonnée, les responsables du salon ont chargé, en 2012, les architectes du bureau d'architectes Dietrich Untertrifaller, de Vorarlberg, d'élaborer un plan directeur pour l'axe ouest du site de la halle d'expositions de Dornbirn.

*Illustration 8.20:
Les incisions elliptiques confèrent au bâtiment une élégance structurelle.*

(Source:

Faruk Pinjo)

Marte.Marte Architectes a remporté le concours pour les halles 9, 10, 11 et 12 en 2014, avec une structure monolithique de 170 mètres de long, presque 70 mètres de large et 16,50 mètres de haut, qui abrite les quatre halles dans une enceinte surdimensionnée. Les architectes de Feldkirch sont surtout connus pour leurs bâtiments expressifs en béton. A Dornbirn, cependant, ils ont surtout convaincu avec le bois comme matériau. Les incisions elliptiques, qui définissent les entrées et les cours, créent une orientation monumentale et élégante. Le concept rigoureux de la couleur, cependant, est le principal responsable d'une impression forte. Extérieur: Structure noire avec des incisions elliptiques en rouge. Intérieur: Noir pour les grandes salles, rouge soutenu pour les foyers et les petites salles de réception. Les arcs elliptiques dans les foyers rouges évoquent des arcades et confèrent à ces espaces une image particulière et recon-

Maître d'ouvrage
Messe Dornbirn

Architecte
Marte.Marte
Architectes,
Feldkirch,
Vorarlberg

**Concepteur
d'éclairage**
Bartenbach lighting
design, Aldrans,
Tirol

**Système
d'éclairage**
Zumtobel, Tecton
Balanced White,
Panos infinity



naissable, notamment en raison de leur couleur dominante. Cela pose toutefois des défis particuliers pour le concept d'éclairage, car il est difficile de créer des ambiances lumineuses attrayantes dans des pièces monochromatiques. Il faut tenir compte des nuances de couleurs, de la structure des surfaces et de leur degré de réflexion pour obtenir un résultat esthétique optimal. «Le peintre a testé d'innombrables nuances de noir pour obtenir un résultat satisfaisant» explique Robert Müller. En tant que chef de projet de Bartenbach, Müller a conseillé les architectes sur le choix des couleurs et des matériaux en ce qui concerne les effets de l'éclairage. Par exemple, les parties visibles des éléments en bois lamellé-collé de 4,5 mètres de haut, qui recouvrent les halles sur leurs largeurs, ont été brossés afin de réduire leur brillance pour ajuster leur degré de réflexion en conséquence.

Sur les conseils de Bartenbach, le concept d'éclairage artificiel existant a été remplacé par des luminaires LED avec la technologie Tunable-White. La couleur de la lumière peut ainsi être adaptée à tout type d'événement. Pour les manifestations en soirée, des illuminations semblables à la lumière des chandelles sont possibles. Lors de l'entrée dans les halles pendant la journée, la lumière blanche froide peut correspondre à la lumière du jour à l'extérieur. Pour donner un effet de profondeur à l'espace, les parois ont été prises en compte. Dans l'ensemble, le concept d'éclairage soutient de manière optimale l'élégance simple du géant noir et rouge. Et comme le bâtiment lui-même, le concept d'éclairage varie entre retenue et mise en scène parfaite.

*Illustration 8.21:
Les grandes pièces
sont caractérisées
par un noir spécia-
lement développé,
les petites pièces
par des tons rouges
soutenus. (Source:
Faruk Pinjo)*





*Illustration 8.22:
Le concept d'éclairage permet
d'adapter la couleur
de la lumière à
chaque événement.
(Source: Faruk
Pinjo)*

8.6 National Gallery, Irlande

Maître d'ouvrage

OPW – The Office
of Public Works
Ireland

Utilisateur

National Gallery of
Ireland, Dublin

Architecte

Heneghan Peng
Architects, Dublin

Concepteur d'éclairage

Bartenbach lighting
design, Aldrans,
Tirol (A)

Protection des monuments historiques-

Blackwood Asso-
ciates Architects

Haute technologie dans un bâtiment historique

Après d'importants travaux de rénovation, les ailes Dargan et Milltown de la National Gallery of Ireland à Dublin se présentent comme des lieux d'art inondés par la lumière du jour. La nouvelle cour intérieure, couverte d'une verrière, entre deux bâtiments historiques est étonnante. Sean Rainbird, directeur de l'Irish National Gallery, est très satisfait de son bâtiment rénové. Ce n'est pas étonnant, après tout, car il a dû se battre avec des toits qui fuyaient avant la rénovation. Les visiteurs se souviennent encore des seaux qui recueillaient l'eau de pluie qui s'écoulait parfois. Lorsqu'on lui demande quel aspect du musée restauré lui plaît le plus, il mentionne avant tout la lumière du jour qui inonde maintenant les salles. «La qualité de la lumière vous donne une grande sensation et fait de vous un visiteur plus attentif quand vous regardez l'art», souligne-t-il. Il y a beaucoup à voir à la Galerie nationale, qui a ouvert ses portes en 1864 et fut l'un des premiers musées publics d'Europe. Plus de 16 300 œuvres d'art font partie des collections – du début de la Renaissance à l'art moderne, des artistes internationaux aux artistes irlandais. Dans les nouveaux espaces d'exposition, 650 objets sont présentés, dont des œuvres de Titien, Rembrandt, Vermeer, Van Gogh, Goya, Monet et Picasso, ainsi que de grands artistes irlandais tels que William Orpen, Mary Swanzy et Jack B. Yeats. Les architectes dublinois Heneghan Peng ont fait en sorte que le bâtiment situé sur Merrion Square, au cœur de Dublin, offre une fois de plus un cadre digne de cette vaste collection. Bartenbach lighting design est responsable de la planification de la lumière du jour et de l'éclairage artificiel. La restauration des bâtiments historiques fait partie d'un plan directeur du musée, également conçu par Heneghan Peng, et qui organise les différentes galeries selon les époques. Dans le cadre de la rénovation, les lanternes historiques des salles du musée ont été équipés d'une grille de protection so-

laire. La micro grille empêche la lumière directe du soleil, mais dirige la lumière du jour vers l'intérieur du bâtiment. En dessous, il y a un verre diffusant sur le plafond des pièces. Cette exposition à la lumière du jour contrôlée satisfait également aux exigences de conservation. Les lux-heures auxquels les tableaux sont exposés sont cumulés et calculés sur l'année. Dans des cas exceptionnels, par exemple lorsque des objets particulièrement sensibles sont exposés, les puits de lumière peuvent être fermés. Un obscurcissement complet est donc possible. En fonctionnement normal, les visiteurs peuvent également apprécier la lumière du jour et les changements climatiques à l'intérieur du musée. La transmission UV de la nouvelle peau de verre est inférieure à 0,01 %. La valeur g est réduite d'environ 80 % à 0,14 % par rapport au vitrage historique. Le transfert de chaleur est également réduit de près de 70 %. Dans les galeries avec puits de lumière, l'éclairage artificiel n'est pas nécessaire pendant la journée, en temps normal. Si le ciel extérieur s'assombrit de manière inattendue, la lumière artificielle s'allume automatiquement. Au-delà du système innovant d'éclairage naturel, les salles du musée, de différentes couleurs, ont représenté un défi pour les concepteurs de l'éclairage. Ils ont discuté des différentes couleurs des parois en ce qui concerne les niveaux de réflexion. Le système d'éclairage artificiel est basé sur la technologie LED, ce qui donne à la galerie un système d'éclairage durable et presque sans entretien. Les rails d'alimentation pour les Wallwasher et les projecteurs s'intègrent parfaitement dans l'ambiance historique. La couleur de la lumière peut être adaptée entre 2700 K et 3500 K en fonction des pièces exposées, de la couleur des parois et de la pièce, car l'ambiance est générée par la lumière reflétée par les parois colorées.

Les architectes ont transformé un puits de lumière et une cour intérieure entre les deux bâtiments historiques des ailes Milltown et Dargan en une cour à sculptures inondée de lumière. Ils ont dégagé des murs en brique et en pierre ainsi que de

généreuses fenêtres, qui soutiennent également l'éclairage des pièces de la galerie. Un vitrage antisolaire couvre la nouvelle cour intérieure large d'environ sept mètres. Le soir, elle est éclairée par des spots LED sur les murs, qui rayonnent sur les réflecteurs de la verrière. Les projecteurs à faisceau étroit et à faisceau large assurent l'éclairage de base ainsi que le balisage. En même temps, ces réflecteurs structurent la verrière.



*Illustration 8.24
(à droite): Les architectes et les concepteurs d'éclairage ont transformé un puits de lumière et une cour arrière en une cour à sculptures inondée de lumière. (Source: Marie Louise Halpenny pour Heneghan Peng Architects)*

*Illustration 8.23
(ci-dessous): Grâce aux puits de lumière, l'éclairage artificiel est rarement nécessaire pendant la journée. (Source: Marie Louise Halpenny pour Heneghan Peng Architects)*



8.7 Lakeside Lucerne

Un hôtel Minergie

Le bureau d'architectes Rüssli a remporté l'appel d'offres pour le bâtiment Lakeside à Lucerne. Même pendant la phase du gros-œuvre, la fonction de ce bâtiment n'était pas encore déterminée. Finalement, un hôtel a été intégré dans une enveloppe conçue pour des bâtiments administratifs: L'hôtel Minergie! Les exigences étaient donc très élevées à un moment où aucun composant LED commercialisable n'était disponible. En effet, des critiques se sont élevées concernant l'impossibilité de créer des ambiances lumineuses avec des prescriptions énergétiques strictes. Par ailleurs, en raison de la pré-installation thermique et sanitaire pour les surfaces de bureau, les aspects énergétiques de l'éclairage étaient prédéfinis avec précision.

Le véritable concept d'éclairage est un mélange d'éclairage limité à la pièce, de luminaires décoratifs et de spots d'accentuation avec une caractéristique de rayonnement semblable à celui du soleil. Un

éclairage comme on en rencontre dans la nature: Horizon clair avec contrastes diffus, comme une image nébuleuse, et avec lumière dirigée du spot d'accentuation comme remplaçant du rayonnement solaire. Les ambiances lumineuses sont définies par le concepteur d'éclairage. Cependant, un ajustement minutieux est nécessaire car les nuances sont décisives dans l'éclairage des locaux. Ainsi, chaque local est unique. Par exemple, un équilibre entre la lumière diffuse et dirigée doit être recherché. En d'autres mots: A quoi ressemble une ambiance lorsque le temps est changeant à l'extérieur? Lorsqu'il fait nuit? Le jour, une relation se produit de l'intérieur vers l'extérieur, la nuit, c'est l'inverse. Les mêmes tâches sont effectuées dans les salles de formation et dans les salles de conférence. Le principe se répète, les ingrédients de base sont toujours semblables, mais c'est le dosage qui change.



Illustration 8.25:
Restaurant de
l'hôtel Minergie
Lakeside.

8.8 Bâtiment Floyd, siège de JTI à Genève

Un symbole pour Genève

Le siège de Japan Tobacco Industries (JTI), d'un volume imposant, est situé sur les rives du Léman. Les architectes de SOM Londres ont trouvé l'inspiration pour la conception de ce monument architectural à Genève dans le paysage environnant, le lac et les Alpes d'une part, et dans les valeurs de la marque JTI d'autre part.

Afin de créer des espaces ouverts et flexibles, ils ont défini trois catégories: Paysage, espaces communs et bureaux. Pour le concept d'éclairage de Bartenbach Lighting Design, il était important de distinguer les différents types de locaux. A côté de la lumière artificielle, la lumière du jour a joué un rôle important: Les points princi-

aux étaient l'apport optimal de lumière naturelle, le bâtiment ayant les façades vitrées, la prévention de l'éblouissement et le chauffage. Il était tout aussi important d'assurer la transparence de l'intérieur vers l'extérieur afin de mettre en scène la vue sur le lac. Pour la façade, constituée de triangles de verre en quinconce, il était essentiel, outre la maîtrise de l'éblouissement et la protection solaire, d'apporter la lumière naturelle à l'intérieur avec un spectre aussi pur que possible. Les verres à quatre couches, la structure de la façade en triangles disposés en quinconce et les supports correspondants ont nécessité des calculs et des études de modélisation approfondis. A l'intérieur, des matériaux brillants au plafond et des sols clairs réfléchissent la lumière du jour et l'apportent jusqu'au fond des pièces, sans éblouir. Des

Illustration 8.26: La transparence caractérise le nouveau et impressionnant bâtiment JTI à Genève. (Source: Hufton and Crow)



écrans internes orientables servent de protection solaire et de l'éblouissement.

A l'intérieur du bâtiment, les différents espaces sont reliés par un «paysage en continu». En plus des bureaux paysagers, il y a 66 salles de réunions, 31 zones de travail communes et 23 cafétérias, ainsi qu'un auditorium, un centre de fitness et un restaurant. Ce parcours continu est jalonné d'aménagements artistiques et éclairé d'une lumière blanc chaud (2700 à 3000 kelvins), comme système de guidage. Dans les bureaux paysagers, le système d'éclairage Aurilux est intégré dans les zones d'ombre entre les panneaux en aluminium. Une lumière de 4000 kelvins pénètre dans l'espace par une fente large de 1,2 cm. Dans les couloirs et le restaurant, des Downlights sont installés. L'aspect volumineux de l'ensemble du bâtiment ne doit pas être altéré par l'éclairage, c'est pourquoi seuls les murs transversaux et non parallèles à la façade sont éclairés. Ces «surfaces lumineuses» renforcent la perception de volume.

La lumière naturelle traverse le bâtiment dont les angles extérieurs sont «surélevés». Les angles du bâtiment ne sont que sur la façade, côté lac. Les lignes lumineuses et le plafond suspendu rétro-éclairé en tôle perforée sont mis en scène et sont

donc reconnaissables pour l'orientation du cheminement. Des lignes lumineuses sont également posées le long des bords supérieurs des bacs à fleurs. La proximité du lac est particulièrement mise en valeur sur les deux terrasses en toiture, comme dans l'ensemble du bâtiment. L'éclairage n'est donc situé que sur le mur extérieur côté lac.

Illustration 8.28: Dans les couloirs et les cages d'escaliers, des Downlights sont encastrés dans le plafond. (Source: Hufton and Crow)



Illustration 8.27: Les matériaux clairs reflètent la lumière dans les bureaux paysagers. (Source: Hufton and Crow)



8.9 Ecole Bläsi

L'optimisation par un éclairage Minergie réduit la consommation d'énergie de 30 % et atteint la valeur cible SIA.

Dans les bâtiments publics (constructions nouvelles et transformations), la ville de Zurich convertit les installations d'éclairage au label Minergie, même si une certification de l'ensemble du bâtiment n'est pas réalisable en raison de prescriptions relatives à la protection du patrimoine. Le respect des exigences d'éclairage est contrôlé de manière cohérente dans tous les bâtiments.

La rénovation de l'école «Bläsi» en est un bon exemple. Le bâtiment datant de 1907 a été totalement remis à neuf en 2015 et l'éclairage a fait l'objet d'une nouvelle planification. Les nouveaux luminaires devaient être similaires à l'éclairage originel des salles de classe, avec des luminaires de plafond ronds suspendus, mais les prescriptions actuelles en termes d'éclairement lumineux, de répartition de la lumière et d'éblouissement devaient correspondre. La prescription énergétique pour l'éclairage était le label Minergie. Une mise en

service impeccable des luminaires et des détecteurs ainsi que la mesure consécutive de la consommation d'énergie faisaient partie intégrante de la rénovation de l'éclairage.

Établissement du justificatif énergétique

Dès une phase de planification précoce, le certificat énergétique a été établi, puis a été actualisé au fil de la planification et de l'exécution, et après la mise en service, a été établi dans l'état de l'installation effectivement réalisée. Cette actualisation multiple est intéressante lorsque l'on cherche à optimiser l'installation d'éclairage, mais ne correspond toutefois pas au label dans de nombreux projets de construction. Le justificatif présenté dans le chapitre précédent reflète la phase d'exploitation de l'école Bläsi: L'indice énergétique de la valeur du projet (réalisée), de 6,2 kWh/m², est nettement inférieure à l'exigence Minergie de 13,3 kWh/m² – et ce, grâce à une optimisation cohérente.

Mandant

Ville de Zurich,
Amt für Hochbauten

Architectes

Horisberger Wagen
Architekten GmbH

Planificateur électricien

Walter Salm, Meier
& Partner AG

Mesures

elight GmbH



Illustration 8.29:
Vue extérieure du
bâtiment scolaire
Bläsi rénové à
Zurich-Höngg.

Mise en service des luminaires avec un éclairage lumineux optimisé

Le bâtiment est en grande partie équipé de suspensions de type «Arno» de la société Licht + Raum AG. Avec une puissance électrique de 83 W et un flux lumineux de 7500 lm, ils atteignent un rendement lumineux de 90 lm/W – une très bonne valeur à ce jour. Avec la technologie de luminaires actuelle, elle serait de 130 lm/W. Étant donné que le positionnement des luminaires doit prendre en compte les conditions architecturales et les conditions de lumière, on obtient selon les pièces une luminosité fortement variable. Grâce à l'équipement avec des régulateurs de puissance à variateur, il a été possible, lors de la mise en service, de régler individuellement chaque luminaire, de sorte que l'éclairage requis est obtenu conformément à l'utilisation effective (salle de classe, couloir, salle des enseignants, salle polyvalente). Grâce à ce réglage, la puissance installée a pu être réduite de 16,8 à 10,9 kW, ce qui correspond à une économie d'énergie de 35 %.

Mise en service des détecteurs

Dans l'ensemble du bâtiment, des détecteurs de présence et de lumière naturelle combinés sont installés. Dans les zones de passage (couloirs, WC, pièces annexes), ils fonctionnent de manière entièrement automatique: en présence d'une lumière naturelle suffisante ou en l'absence de personnes, la lumière s'éteint automatiquement, et se rallume à nouveau en présence de personnes ou si la lumière naturelle est trop faible. Dans les salles de classe, l'éclairage est semi-automatique, c'est-à-dire que seule la désactivation s'effectue avec la régulation – l'activation doit être réalisée manuellement.

Un facteur d'efficacité important est le délai de désactivation lorsque la présence de personnes n'est plus détectée ou en présence d'une lumière naturelle suffisante.

Tandis que ce délai, dans la plupart des bâtiments, est de 15 minutes, il a été réduit à 5 minutes dans l'école Bläsi. Cela représente une économie d'environ 20 %. S'il avait été réduit à 2 minutes, on aurait obtenu une réduction supplémentaire de 20 %!



Illustration 8.30:
Vue intérieure
d'une salle de classe
avec suspensions
«Arno».

Bilan de l'optimisation

Grâce au réglage des luminaires à la bonne intensité d'éclairage et au réglage des détecteurs de lumière avec un délai de désactivation raccourci, la consommation d'énergie pour l'éclairage est réduite de plus de 50 % – dans l'école Bläsi, elle passe de 13,3 à 6,2 kWh/m². Des mesures ont montré que les valeurs calculées sont également réalisées dans la pratique.

Aucune perte en termes de performance!

Pour vérifier la consommation d'énergie effective de l'éclairage, un compteur d'énergie séparé a été installé. Étant donné que les réseaux électriques ne sont généralement pas répartis en groupes de consommateurs, l'acheminement séparé des lignes électriques pour l'éclairage a induit des dépenses supplémentaires en termes d'ins-

tallations techniques. Pendant un an, la consommation d'énergie a été enregistrée. Stockées à intervalles de 5 minutes, on a obtenu environ 100 000 valeurs de mesure qu'il a fallu analyser et interpréter. Le graphique représente des valeurs hebdomadaires. On y voit notamment la baisse de consommation d'énergie pendant les vacances scolaires, en plus des variations saisonnières et dues aux conditions météorologiques.

La comparaison du calcul et de la mesure montre un étonnant résultat: considérés sur l'année entière, les chiffres sont quasiment identiques. Grâce à cette précision, on peut considérer que le hasard a joué un rôle jusqu'à un certain point. Toutefois, les chiffres montrent que le modèle de calcul de la norme SIA 387/4 permet d'effectuer des calculs très précis.

Tableau 8.1:
Comparaison
mesure – calcul.

		Valeur de mesure	Valeur de calcul
Consommation d'énergie	MWh/a	10,2	10,1
	kWh/m ²	3,9	3,9
Puissance installée	kW	8,4	10,9
	W/m ²	3,2	4,2
Heures de pleine charge	h/a	1220	922
Surface éclairée	m ²	2597	2597

Consommation d'électricité par semaine en kWh

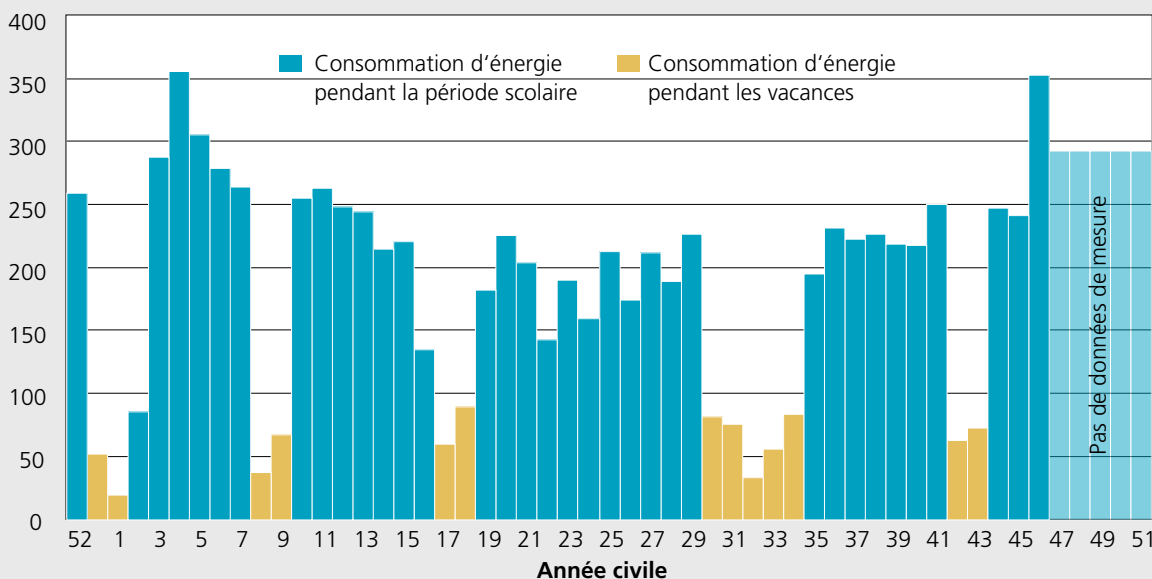


Illustration 8.31:
Mesure de la
consommation
d'électricité pour
l'éclairage dans le
bâtiment scolaire
Bläsi.

8.10 Bâtiment administratif, Altstätten

Emplacement, maître de l'ouvrage et architecte

Göldinpartner Architekten AG
9450 Altstätten

Planificateur électricien

Projekt AG
9435 Heerbrugg

Eclairage

Zumtobel Licht AG
8050 Zurich

Éclairage variable et commande optimisée de la lumière du jour

L'immeuble de bureaux de 4 étages de Göldinpartner Architekten a été achevé en 2017 et est situé directement à la gare d'Altstätten. Il mesure 32 mètres de long et seulement 6 mètres de large en raison de son emplacement entre les voies et la route. Au rez-de-chaussée se trouvent la réception et l'escalier menant aux bureaux, sinon l'espace est ouvert et sert de parking. Aux premiers et deuxièmes étages, travaillent les architectes. Dans la petite construction du troisième étage se trouve une salle commune spacieuse avec terrasse et vue sur les montagnes Appenzeloises.

Le bâtiment est construit en béton apparent, ce qui lui donne aussi du caractère à l'intérieur. Le concept d'éclairage a représenté un défi, car le béton apparent absorbe une quantité relativement importante de lumière, d'autant plus qu'aucun luminaire encastré n'était envisagé. La solution d'éclairage choisie est un ensemble de luminaires suspendus au-dessus des postes de travail et de projecteurs orientables pour l'éclairage des murs et des expositions. Les luminaires suspendus ont toutes les caractéristiques d'un excellent luminaire pour un poste de travail, avec leur lumière directe/indirecte, et évitent

également les effets de caverne qu'un luminaire purement direct aurait pu produire. Les projecteurs dirigés sur les surfaces verticales rendent les pièces, plutôt étroites, plus spacieuses.

Les luminaires suspendus modulaires peuvent être commandés individuellement afin de répondre aux exigences des conditions de travail les plus diverses (Illustration 8.35). Les luminaires et les stores sont également intégrés dans un système de gestion de l'éclairage en fonction de la lumière du jour. A l'aide des données générées par un capteur de lumière du jour à l'extérieur du bâtiment, le système peut garantir une luminosité constante. Grâce au système de gestion de l'éclairage LITECOM infinity, une solution d'éclairage économe en énergie a été créée et offre un confort d'utilisation maximal.

Illustration 8.33: Concept d'éclairage de bureau: luminaires suspendus / projecteurs orientables. (Image: Zumtobel)



Illustration 8.32: Architecture du bâtiment, caractérisée par son emplacement entre la voie ferrée et la rue. (Image: Zumtobel)



Le bilan énergétique, selon la norme SIA 387/4, montre que le standard Minergie pour l'éclairage a été largement respecté, avec une valeur de 9,8 kWh/m². Valeur qui est plus basse que l'exigence encore plus stricte du programme de financement fédéral «Prokilowatt» (Tableau 8.2).

Luminaires installés

- Luminaires suspendus SEQUENCE infinity, 105 W / 9650 lm (Luminaire Minergie)
- Projecteurs ARCOS xpert, 30 W/2000 lm
- Système de chemin lumineux TECTON basic, 36 W 6200 lm (Luminaire Minergie)

Illustration 8.34:
Contrôle variable
de la lumière di-
recte et indirecte.

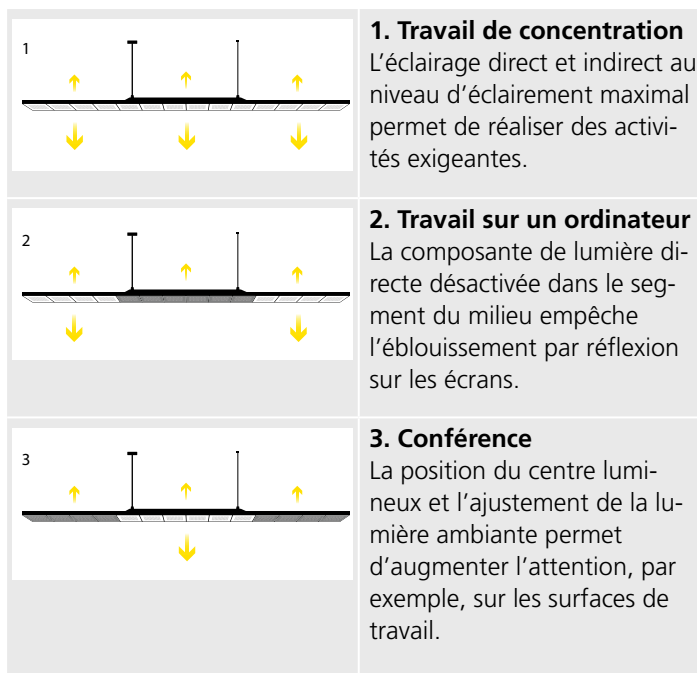


Illustration 8.35:
Simulation d'éclairage de bureau.
(Image: produite avec le programme Dialux)



Pièce	Surface	Utilisation standard	Valeur du projet en kWh/m ²	Exigences en kWh/m ²			
				Valeur limite SIA	Minergie	Pro-Kilowatt	Valeur-cible SIA
Planification	156 m ²	Bureau paysager	10,9	19,0	13,1	11,1	7,1
Entretien	22 m ²	Salle de conférence	2,2	9,4	5,5	4,2	1,6
Entrée	38 m ²	Entrée	6,2	9,6	5,9	4,7	2,2
Bibliothèque	16 m ²	Bibliothèque	12,1	11,8	8,6	7,5	5,4
Archives	35 m ²	Utilisation spécifique	12,7	27,4	18,2	15,1	8,9
Résultat global	267 m ²		9,8	17,5	11,8	9,9	6,1

Vert: les exigences sont remplies

Rouge: les exigences ne sont pas remplies.

Le résultat global s'applique. Les groupes de pièces dont l'éclairage est moins efficace sont définis par rapport aux pièces dont la performance est optimale.

Tableau 8.2:
Bilan énergétique
selon la SIA 387/4.

8.11 Bâtiment administratif à Pully

Objet

Immeuble administratif «Pallin»
1009 Pully

Maître d'oeuvre

Chappuis et
Delarive SA
1009 Pully

Architecte

CCHE Architecture
et Design SA
1000 Lausanne 16

Eclairage (groupe du maître d'oeuvre)

Régent Appareils
d'éclairage SA
1052 Le Mont-sur-
Lausanne

Nouveau concept pour l'éclairage de bureaux

Pour la réalisation d'un éclairage de bureaux, deux concepts sont possibles, ayant chacun ses avantages et inconvénients:

- Luminaires sur pied
- Plafonniers.

La variante des luminaires sur pied a l'avantage d'un aménagement flexible des bureaux. Quel que soit l'endroit où se trouvent les bureaux, l'éclairage est disponible; les postes de travail sont donc pourvus d'un éclairage optimal. Aucun câble ou connexion n'a besoin d'être installé au plafond. Les inconvénients se situent au niveau du réaménagement de la pièce, surtout s'il s'agit d'un bureau individuel. Des câbles au sol peuvent représenter des obstacles indésirables.

Avec les plafonniers, il est facile d'obtenir un éclairage régulier de la pièce. Aucun câble ou pied ne nuit à l'esthétique et au mouvement dans la pièce. L'installation est plus complexe qu'avec des luminaires sur

pied. Des meubles ou un plafond irrégulier (avec, par exemple, des éléments suspendus tels des conduits d'insonorisation ou de ventilation) peuvent nuire à la distribution de la lumière et celle-ci peut être moindre sur les postes de travail individuels. Des lampes de table supplémentaires doivent alors compléter l'éclairage de base.

Comme troisième et nouvelle variante, Regent propose désormais un luminaire Up-Light. La lampe en forme de vase à fleurs est placée sur le bureau et la lumière, projetée verticalement vers le haut sur le plafond, est réfléchiée sur le bureau et dans

Illustration 8.37: Bureaux avec les luminaires Stream Uplight. (Image: Regent)



Illustration 8.36: Vue extérieure du bâtiment administratif Pallin à Pully. (Image: Regent)



le reste de la pièce. Il y a deux avantages par rapport à une solution de luminaire sur pied:

■ Il n'y a pas de pieds et de seuils dans la pièce qui bloquent le passage et perturbent l'apparence de la pièce.

■ Et plus important encore: Le capteur de lumière qui y est associé est branché directement sur le luminaire, comme une souris d'ordinateur. Ainsi, la mesure de l'apport en lumière naturelle est, directement, prise au bon endroit, sur la surface du bureau. Les capteurs de lumière au plafond mesurent la situation de la lumière du jour de

manière incorrecte dans de nombreux cas, parce qu'ils ne captent que la réflexion de la lumière du jour – et cela peut être très différent selon la clarté du mobilier et fournir des informations erronées sur la lumière du jour au module de commande.

L'immeuble administratif «Pallin» à Pully, d'une surface de 3483 m², compte 5 étages et se divise en deux corps de bâtiments et neuf unités de construction. Au printemps 2019, le bâtiment est certifié Minergie.

Dans l'une des nouvelles unités de construction, le maître d'ouvrage «Chappuis et Delarive SA» a réalisé la variante d'éclairage avec les luminaires «Stream» de la société Regent. Au total, 18 luminaires éclairent une surface de bureaux d'environ 320 m². Les luminaires sont réglés selon la présence et la lumière du jour. Comme l'utilisation de la lumière du jour est très élevée dans les bureaux, les besoins en énergie pour l'éclairage sont relativement faibles et répondent sans problème aux exigences Minergie. L'éclairage a été planifié à l'aide du logiciel Relux Desktop; la simulation montre une distribution lumineuse très uniforme sur les postes de travail avec un éclairage moyen de 556 lux (facteur de maintenance: 0,8).

Caractéristiques d'éclairage	
Niveau d'éclairage (Em) place de travail	560 lux (min. 410 lux, max. 650 lux)
Niveau d'éclairage (Em) pièce	390 lux
Puissance installée	7,96 W/m ²
Heures à pleine charge (selon SIA 387/4)	423 h/a
Demande spécifique en énergie	3,4 kWh/m ²
Exigence Minergie	10,2 kWh/m ²
SIA 387/4 – Valeur limite	17,3 kWh/m ²
SIA 387/4 – Valeur cible	3,0 kWh/m ²
Type de luminaire	Uplight «Stream» de Regent
Puissance	143 watts
Flux lumineux total	17 000 lumens
Efficiency	119 lm/W
N° Minergie	VD-2121 (avril 2019)

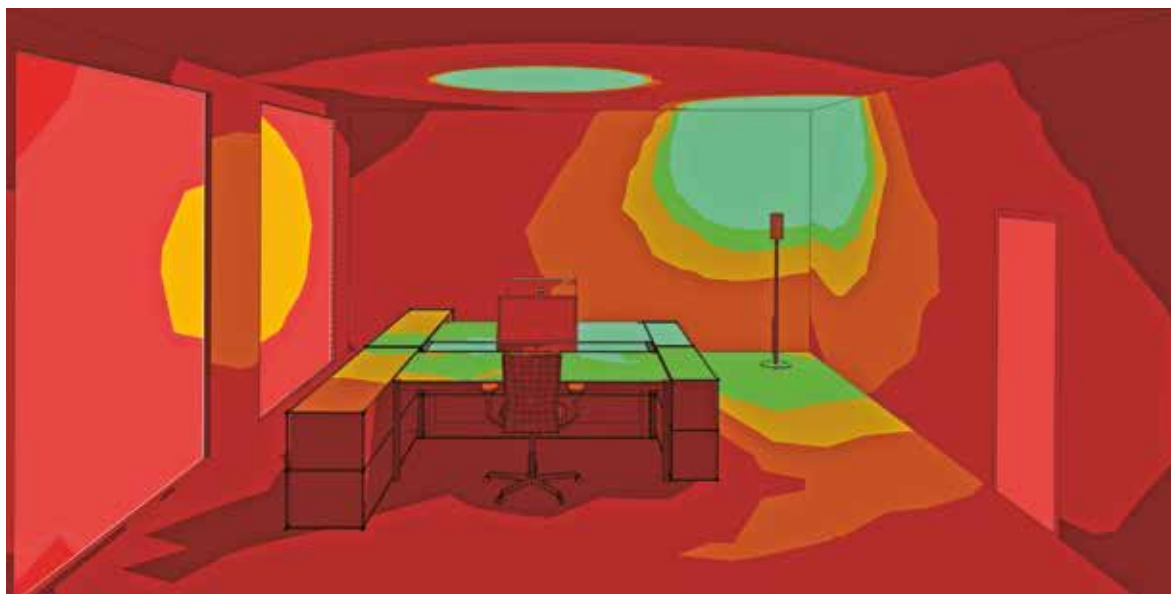


Illustration 8.38: Simulation d'éclairage d'un bureau. (Image: réalisé avec le logiciel Relux Desktop)

8.12 Immeuble commercial Quadrolith

Objet Des luminaires intelligents qui com- binent luminaires, capteurs et gestion de l'éclairage

Immeuble commercial Quadrolith 6340 Baar

Des bandes métalliques verticales de couleur or structurent la façade des deux luxueux bâtiments commerciaux Quadrolith à Baar, dans le canton de Zoug. Les bâtiments en forme de U offrent de la place pour un total de 1000 postes de travail sur six étages et 27 000 mètres carrés de surface commerciale. La faible profondeur de construction, près de 20 m, et les fenêtres du sol au plafond assurent une grande efficacité lumineuse dans l'espace et d'excellentes conditions d'éclairage.

Maître d'oeuvre
Alfred Müller AG
6340 Baar

Architecte
Axess Architekten
6300 Zug

Lumière et planification électrique

Thomas Lüem
Partner AG
6340 Baar

Eclairage (luminaires intelligents)

Swisslux AG
8618 Oetwil
am See

Avec Quadrolith, le maître d'oeuvre, Alfred Müller AG, propose des surfaces de location flexibles pour des concepts de bureaux modernes dans un emplacement très recherché. Un produit réussi pour la société immobilière basée à Baar: Peu avant la fin de la première étape, elle a déjà loué tout l'espace de ce nouveau bâtiment de grande qualité et bien situé.

Le maître d'oeuvre attendait aussi de l'efficacité et de la flexibilité en termes d'éclairage. Le planificateur a donc décidé d'uti-

liser des luminaires intelligents dans toutes les zones de passage. Chaque luminaire est équipé de son propre capteur qui détecte le mouvement des personnes dans l'espace. Les luminaires sont mis en réseau les uns avec les autres par radio ou par câble. Cela permet non seulement d'activer automatiquement le luminaire selon la position d'une personne, mais aussi de reconnaître la direction vers laquelle elle se déplace. Les luminaires encastrés, ronds et de grand format, installés dans la zone d'entrée sont allumés «à l'avance» lors du passage d'une personne, de sorte que la lumière soit dirigée vers les cages d'escaliers et les ascenseurs.

Le système d'éclairage TRIVALITE installé par Swisslux comprend différents programmes de commande d'éclairage que les locataires peuvent adapter à tout moment selon leurs besoins individuels, à l'aide d'une application smartphone. Grâce à l'intelligence de SWARM-Control, la lumière se déplace d'un luminaire à l'autre lorsqu'une personne traverse le couloir, la cage d'escaliers ou la zone d'entrée et s'éteint lorsqu'elle n'est plus nécessaire. Non seulement l'éclairage s'allume et s'éteint, mais il règle également la luminosité en fonction de la lumière ambiante,



Illustration 8.39:
Le Quadrolith doré
de Baar vu de l'ex-
térieur. (Illustration:
Swisslux)

ce qui permet une utilisation optimale de la lumière du jour disponible. La variation douce de l'éclairage est aussi perçue comme très agréable par les utilisateurs. Depuis que la technologie a évolué grâce aux luminaires LED, la production de lumière est devenue plus de 400 % plus efficace que la technologie halogène. Les luminaires LED sont également graduables presque sans perte et ont une énorme résistance de commutation. La commande d'éclairage adaptée à l'application et l'efficacité énergétique qui en résulte sont ainsi au centre de l'attention. Cependant, les solutions d'éclairage qui exploitent pleinement les avantages des LED et restent simples pour toute personne impliquée dans le projet sont encore peu représentées sur le marché aujourd'hui. C'est là qu'intervient le TRIVALITE de Swisslux: Le résultat est un luminaire intelligent, réduit à l'essentiel, avec une gestion de l'éclairage intégrée, qui fonctionne individuellement ou avec plusieurs luminaires dans un groupe. La solution complète réduit au minimum l'effort de planification et l'architecte peut réaliser la conception de la structure du bâtiment de manière linéaire, sans interfaces externes perturbatrices telles que boutons, inter-

rupteurs ou capteurs. L'installation et la mise en service des luminaires intelligents sont simples: Chaque luminaire est immédiatement prêt à fonctionner dès son installation. La sélection du programme de commande et des réglages individuels s'effectue via une application smartphone. Comme le montre l'exemple, en référence, du siège d'une grande entreprise bernoise, les heures de pleine charge ont pu être réduites de 60 % par rapport à l'ancienne installation remplacée par des luminaires intelligents, uniquement grâce au système de commande adapté à la demande (Illustration 8.40).

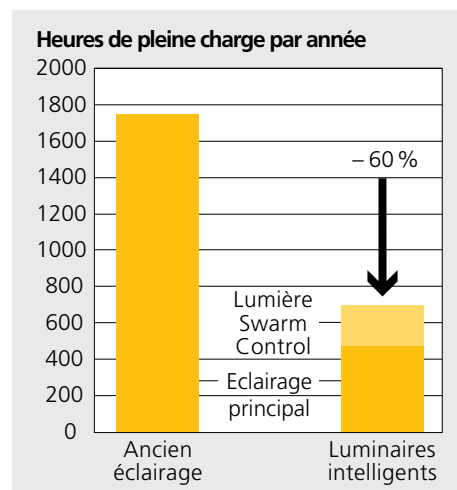


Illustration 8.40: Bilan énergétique avec et sans luminaire intelligent.



Illustration 8.41: Zone d'entrée avec des luminaires intelligents qui s'allument par anticipation. (Illustration: Swisslux)

Annexe

9.1 Auteurs

Stefan Gasser, ingénieur en électricité dipl. EPF, jusqu'en 1996, chef du domaine Utilisation rationnelle de l'électricité chez Amstein + Walthert AG, depuis 1996, conseiller en énergie indépendant et chef de projet Recherche, Développement et Mise en œuvre pour l'utilisation efficace de l'énergie dans les éclairages pour divers mandants (Office fédéral de l'énergie, Ville de Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Minergie, Prokilowatt, Coop, banques, etc.). Membre de la Commission de la norme SIA 387/4 (Illumination dans les bâtiments) et auteur de la norme SIA 387/4 (éclairage).



Daniel Tschudy, architecte dipl. EPF, études post-grade éclairagisme à l'Université technique d'Ilmenau, 1996, MBA University of Southern Queensland (2010), partenaire et membre de la direction de Amstein + Walthert AG, puis Reflexion AG. Directeur Conseil chez Bartenbach Lighting Design. Nombreux projets de conception d'éclairage dans les bâtiments et les installations ainsi que normalisation et efficacité énergétique, membre du comité de la SLG et délégué auprès du CEN. Depuis 2019, Directeur de l'Association Suisse pour l'Éclairage (SLG).



Certaines contributions ont été rédigées par **Gabriel Baltensweiler**, designer et fabricant de luminaires haute performance dans l'entreprise familiale du même nom, depuis 1951 à Ebikon près de Lucerne.

9.2 Informations complémentaires

Fabricants de luminaires, lampes et modules de commande (sélection)	
Website	Description
zumtobel.ch	La société autrichienne est active dans le monde entier, elle est également très présente sur le marché suisse.
regent.ch	La plus grande entreprise suisse de lampes et d'éclairage.
tulux.ch	Entreprise suisse traditionnelle d'éclairage professionnel depuis 1948.
baltensweiler.ch	La société suisse, active depuis 60 ans, est spécialisée dans les luminaires pour des exigences design élevées.
belux.ch	Également une société d'éclairage suisse avec des luminaires design pour l'habitat et les locaux commerciaux.
ribag.com	Société suisse de luminaires avec une vaste offre en luminaires de bureau.
lighting.philips.ch	Le portail Internet suisse du fabricant néerlandais de lampes et de luminaires.
osram.ch	L'ancien géant de l'éclairage s'est retiré du marché des lampes automobiles, des modules LED, des ballasts, des automates et des luminaires.
ledvance.ch	Le fournisseur chinois a repris les activités d'Osram dans le domaine des lampes et peut utiliser le label «Osram» pendant un certain temps.
ledcity.ch	Fournisseur de tubes LED de remplacement de haute qualité (tubes LED) avec capteurs intégrés pour des temps de déclenchement très courts.
tridonic.com	Fabricant de transformateurs et d'appareils de commande pour lampes à décharge et LED.
Capteurs et lampes intelligentes (sélection)	
swisslux.ch	Fournisseur de détecteurs de présence et de mouvement BEG-Luxomat et de luminaires intelligents développés en interne (www.trivalite.ch).
steinel.de	Fabricant de détecteurs de présence et de mouvement basés sur différentes technologies (PIR, HF, ultrasons, caméra) et de luminaires à capteurs.
nevalux.swiss	Partenaire commercial de Steinel en Suisse et conseiller en capteurs et luminaires intelligents.
theben-hts.ch	Fournisseur de détecteurs de présence et de mouvement.
sensnorm.ch	Association des fournisseurs de capteurs.
knx.ch	Le standard mondial KNX pour le contrôle du chauffage, de l'éclairage, des stores, de la ventilation, du multimédia et de la technologie de sécurité dans tous les domaines.
Mesures et simulations	
Website	Description
metas.ch	Le laboratoire suisse de mesure professionnel de lampes et de luminaires. Lien détaillé: metas.ch/metas/fr/home/fabe/optik.html .
relux.com	Logiciel gratuit (ReluxDesktop) pour la simulation de systèmes d'éclairage à l'aide d'une vaste base de données de luminaires. Intégration du certificat d'éclairage SIA 387/4 via Plug-In.
dialux.de	La concurrence européenne de la société suisse Relux offre également un logiciel gratuit pour la simulation des installations d'éclairage.
jeti.com	Fabricant d'appareils de mesure pour les mesures spectrales des couleurs
technoteam.de	Fabricant d'appareils de mesure pour la technique d'éclairage professionnelle.
konicaminolta.ch	Le meilleur choix d'instruments de mesure de l'intensité lumineuse (luxmètre) et de luminance (luminancemètre).
smart-instruments.ch	La société Lucet à Berne propose des spectromètres compacts qui peuvent être utilisés et lus via une application Smartphone.
lighttool.ch	Outil en ligne gratuit pour établir le bilan énergétique de l'éclairage selon la norme SIA 387/4 et les standards Minergie.

Associations et organisations (sélection)

Website	Description
fvb.ch	L'Association des industries de l'éclairage regroupe les principaux fabricants de luminaires techniques, de composants et de sources lumineuses.
slg.ch	Association suisse pour l'éclairage: Association d'environ 400 membres. Propose des formations continues complètes et élabore des directives pour diverses applications d'éclairage.
sia.ch	La Société suisse des ingénieurs et des architectes élabore des normes et des standards pour les bâtiments et les installations. Entre autres la SIA 387/4, Électricité dans les bâtiments – Illumination: Calcul et exigences.
minergie.ch	Label de qualité pour l'efficacité énergétique des bâtiments, soutenu par l'économie, les cantons et la Confédération.
litg.de	Deutsche Lichttechnische Gesellschaft.
cie.co.at	Commission internationale de l'éclairage CIE basée à Vienne. Organisation faitière d'éclairage dans les pays participants.
cenelec.eu	Comité européen de normalisation dans le domaine électrotechnique.
zvei.org	Deutscher Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie.
zhagastandard.org	Zhaga élabore des spécifications standardisées de composants LED.

Plateformes d'information

Website	Description
toplicht.ch	Informationsplattform für effiziente Beleuchtung mit zahlreichen Dokumenten zum Downloaden und einer Liste aller nach Minergie zertifizierten Leuchten für Dienstleistungs- und Industriebauten. Eine Webseite der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E.
lightbank.ch	Plate-forme pour les programmes de financement de l'éclairage Prokilowatt (www.prokw.ch).
effeled.ch	Programme national de soutien pour un éclairage efficace dans les bâtiments utilitaires (à partir de 2000 m ²).
senso70.ch	Programme national de soutien pour un éclairage efficace dans les bâtiments fonctionnels (jusqu'à 2000 m ²).
salvaluce.ch	Programme national de soutien pour un éclairage efficace dans les bâtiments résidentiels (à partir de 2000 m ²).
faktor.ch	Informations sur les constructions durables, édition de produits imprimés.
darksky.ch	Organisation engagée dans la réduction de la pollution lumineuse. Membre de «International Dark-Sky Association» (IDA).
on-light.de	Plateforme Internet allemande avec portail d'adresses et informations sur le thème «Lumière dans le réseau».
lichtnet.de	Site web de la revue spécialisée «Licht» – le plus grand magazine d'éclairage de l'espace germanophone.

9.3 Index des mots clés

A

Accord de Davos sur la lumière 145
Angle du faisceau 30
Appareil de mesure de l'énergie et de la puissance 119
Association 7

B

Ballast électronique B.E. 66
Ballasts conventionnels 66
Bâtonnets 8
Bilan énergétique global 24

C

Calcul des besoins en énergie 44
Candela 19
Capteur à hautes fréquence 108
Capteur de lumière du jour 128
Capteur de toiture 112
Capteur d'image CCD 114
Capteur infrarouge passif (PIR) 105
Capteurs à ultrasons 108
Capteurs optiques 109
Caractéristique de rayonnement 93
Cellule photo 112
Certificat 101
Classes d'efficacité 27
Commande d'éclairage 180, 181
Concept de human sensitive lighting 129
Cônes 8
Consistance des couleurs 32
Courbe Black Body 78
Courbe de répartition lumineuse 93
Courbe V-lambda 21
Cree-True-White 74
Cycles de commutation 31

D

DALI 104
Degrés de réflexion 39
Dépression hivernale 12
Détecteur de mouvement 105
Détecteur de présence 57, 105
Diagramme Söllner 130

Diodes électroluminescentes 71
Diodes luminescentes 63
Disponibilité en lumière du jour 134
Durée de vie des LED 73
Durée de vie d'une lampe 31

E

Eclairage Minergie 50
Eclairage lumineux 21, 35
Effet biologique 8
Effet lumineux 123
Effets non visuels 11
Effet spatial 123
Efficacité énergétique 11, 71
Efficacité lumineuse 67
EN 12464 34, 55
EN 12464-1 133
EN 13032 98
EN 15193-1:2017 33
Énergie de fabrication 88
Energy Saver 31
EN ISO/IEC 17025 98
EPBD: Energy Performance of Buildings Directive 33
Espace chromatique 77
Étiquette-énergie 27
Évaluation des besoins en énergie 45
Exigences du système 34
Exigences individuelles 34
Exposition à la lumière du soleil 136

F

Facteur d'efficacité des luminaires 98
Facteur de maintenance 37
Facteur de planification 37
Facteur de puissance électrique 32
Facteur de transmission du verre 42
Facteur qui mesure l'éblouissement 35
Fichier Eulum 97
Flux lumineux 20, 67, 35
Frais d'entretien 121

G

Gestion thermique 124
 Guidage de la lumière 79, 137

H

Hauteur du point lumineux 35
 Heures à pleine charge 35
 Human Centric Lighting 12

I

Indice de Rendu des Couleurs IRC 78
 Indice du local 35
 Indice-Minergie 50
 Intensité lumineuse 19
 Interdiction des lampes halogènes 29

L

Laboratoires de mesure 102
 Lampe à halogénure métallique 66
 Lampes à décharge 66
 Lampes à filament 84
 Lampes économiques 70
 Lampes fluorescentes 65
 Lampes halogènes 65
 Lanterneaux 42
 L'autonomie en lumière du jour 135
 Les valeurs limites 34
 lighttool 58
 Linteau 42
 Liste de contrôle d'éclairage 53
 Locaux types 53
 Longueur d'onde 6
 Lumen 20
 Lumière bleue 16, 88
 Luminaire intelligent 110
 Luminaires design 92
 Luminaires domestiques 89
 Luminaires intelligents 180
 Luminaires Minergie 98, 128
 Luminaires professionnels 89
 Luminance 22
 Luminosité du local 39
 Lux 21
 Luxmètre 55

M

Maintien du flux lumineux 31
 Maximum photopique 11
 Maxwell 5
 Mesure de l'éclairement lumineux 53
 METAS 102
 Métaux de terres rares 72
 Méthode des courbes limites 130
 Modulation des couleurs pour les LED 74
 Module Minergie 127

N

Norme d'éclairage SN EN 12464-1 130
 Norme EN 15193 41
 Norme SIA 387/4 33
 Nouvelle norme sur la lumière du jour EN 17037 134

O

Obligation de déclaration 30
 OLED 72, 88
 Ombrage 43
 Optimisation 125, 140

P

Partie indice énergétique Eclairage 34
 Perception look-up 10
 Perception visuelle 9
 Percevoir 7
 Photogoniomètre 68
 Photogoniomètre à miroir tournant 96
 Photogoniomètre en champ proche 96
 Phototoxicité 16
 Plan gris 124
 Planification de l'éclairage 123
 Pollution électromagnétique 87
 Pollution lumineuse 147
 Potentiel d'économies 23, 53, 58, 107, 121
 Prix Nobel 71
 Procédure, procédé UGR 130
 Processus de la perception 8
 Processus visuels 8
 Profondeur du balcon 43
 ProKilowatt 50
 Protection contre l'éblouissement 137
 Protection solaire 43, 56
 Puissance du système 67
 Puissance installée 37

Q

Quotient de lumière du jour 135

R

Radiateur thermique 63
Rails lumineux 118
Rapport vitrage/sol 41
Rapport vitrage/surface au sol 56
Rayonnement électromagnétique 6
Réflexion dans le local 43
Régulation constante de la lumière 113
Régulation de la lumière 43, 141
Régulation de l'éclairage 57
ReluxEnergy 52
Remplacer les luminaires 141
Rendu des couleurs 32, 75
Rentabilité 121, 144
Répartition de l'éclairage lumineux 163
Répartition lumineuse 127
Retrofit 141
Risques de la lumière bleue 15
Rythme circadien 14
Rythme sommeil-éveil 12

S

Sensation de luminosité 7
SIA 108 125
SIA 2024 125
SN EN 12464-1:2013 130
SN EN 15193 133
Spectre chromatique 75
Sphère d'Ulbricht 68
Standard KNX 103
Standard Minergie 49
Statistique du marché 25
Surface de référence énergétique 34
Système colorimétrique CIE 77
Système de gestion de la lumière 105
Système de gestion de l'éclairage 114
Système de lentilles 79

T

Tâche visuelle 161
Taux de défaillance précoce 32
Technique PAL 74
Technologie LFO 79
Technologies de convertisseurs 82
Température de couleur 77
Temps d'allumage 31
Temps de déclenchement 57, 143
Temps de démarrage 31
Terres rares 72

Toplicht 100

Transmission du signal 103

Triangle des couleurs 77

True-Presence 108

Tube néon 66

Type de lampe 67

Types de culots 140

U

Utilance 38

Utilisation de la lumière du jour 56

Utilisations standard 45

V

Valeur cible SIA 387/4 34, 45, 48

Valeur limite SIA 387/4 45, 48

Valeurs de projet 34

Valeur UGR 35

Voir 7