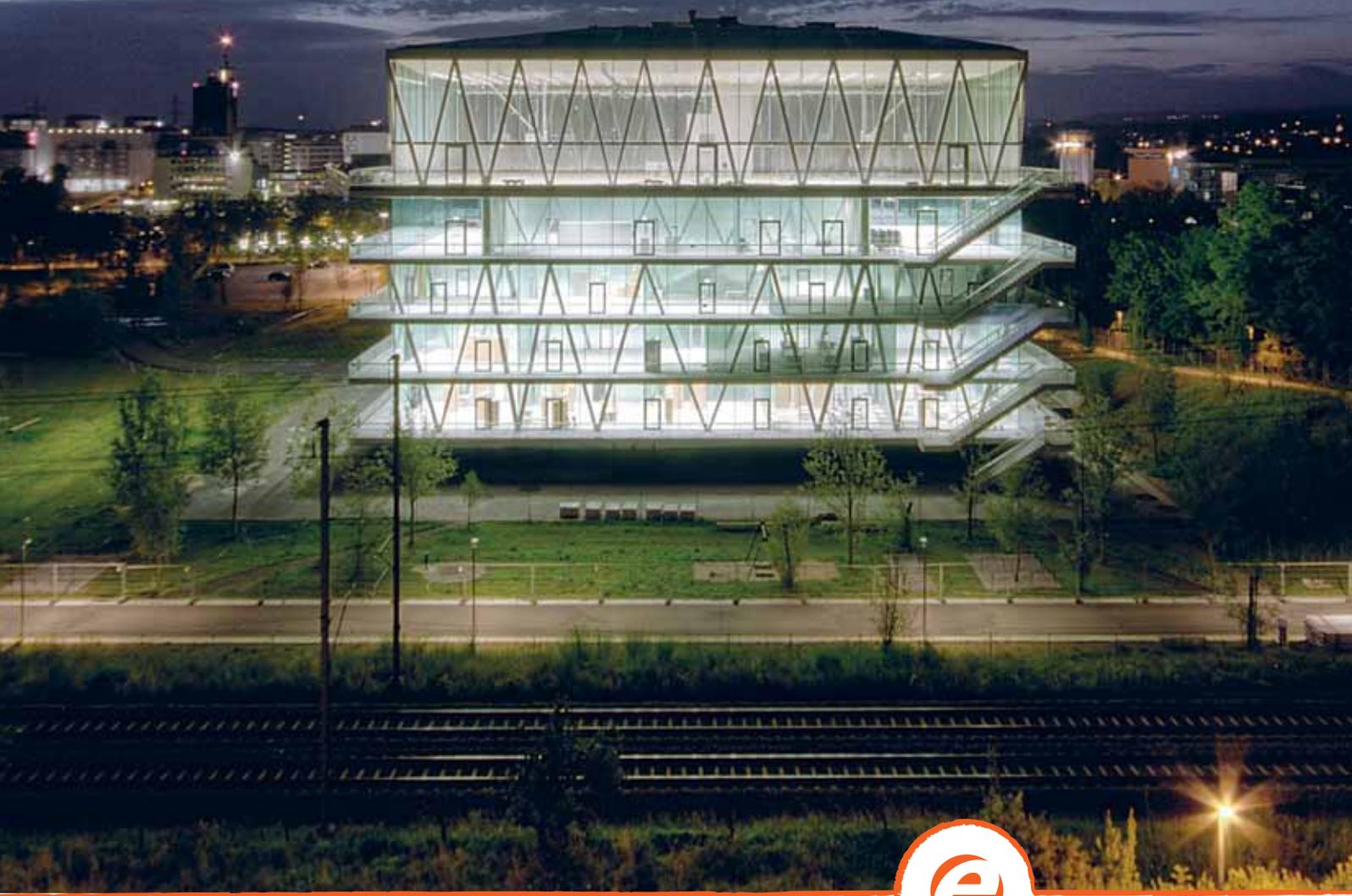


Stefan Gasser | Daniel Tschudy

L'éclairage intérieur

Efficacité énergétique de l'éclairage



suisse énergie



Conférence des directeurs
cantonaux de l'énergie



Contenu

1. La lumière	5	6. Commande et régulation	101
1.1 Exploration de la lumière!	5	6.1 Bases	101
1.2 Rayonnement électromagnétique	6	6.2 Capteurs	103
1.3 Voir et percevoir	7	6.3 Efficacité et autoconsommation électrique	108
1.4 Les termes techniques de la lumière	12	6.4 Efficacité des réglages (projet de mesure)	110
1.5 Le marché de l'éclairage	18	6.5 Eclairage des couloirs avec des LED (projet pilote)	113
2. Evaluation énergétique	21	7. Conception et optimisation	117
2.1 L'étiquetteEnergie	21	7.1 Bases de la planification	117
2.2 Interdiction des lampes à incandescence	22	7.2 Exemple d'optimisation	119
2.3 Norme SIA 380/4	27	7.3 Utilisation de la lumière du jour et régulation	124
2.4 Euronorme EN 12464	44	7.4 Optimisation de fonctionnement dans les bâtiments existants	128
2.5 Standard Minergie	48	7.5 Rentabilité	132
2.6 Liste de contrôle d'éclairage pour les bâtiments utilitaires	51	7.6 Potentiel d'économies avec l'éclairage des bâtiments industriels	133
2.7 Assurance qualité efficacité énergétique	56	7.7 Utilisation de l'obscurité	134
3. Lampes	59	8. Etudes de cas	135
3.1 Typologie des lampes	59	8.1 Ecole de Leutschenbach	135
3.2 Radiateur thermique	60	8.2 Centre des congrès Davos	139
3.3 Lampes fluorescentes	62	8.3 Technorama Winterthour	143
3.4 Lampes à décharge	67	8.4 Centre psychiatrique Appenzell	147
3.5 Mesure des lampes	67	8.5 Bibliothèque cantonale de Liestal	151
3.6 Lampes économiques: erreurs courantes	70	8.6 Hôpital municipal Triemli	155
4. LED: diodes électroluminescentes	71	8.7 Le théâtre de Zurich	159
4.1 Propriétés et comportement de fonctionnement	71	8.8 Lakeside Lucerne	160
4.2 Avantages des LED	73	8.9 AZ Medienhaus	161
4.3 Défis	75	8.10 Bâtiment administratif Helvetia	162
4.4 Produits et applications	80	8.11 LED à la Coop de Pfäffikon	165
4.5 Lampes LED à l'épreuve	81	8.12 Maison d'habitation avec éclairage optimisé	168
4.6 Charte de qualité pour LED	85	9. Annexe	171
4.7 Idées fausses sur LED	86	9.1 Auteurs	171
5. Luminaires	89	9.2 Informations complémentaires	172
5.1 Luminaires professionnels et d'intérieur	89	9.3 Index des mots clés	174
5.2 Typologie	95		
5.3 Mesure des luminaires	95		
5.4 Luminaires Minergie	97		

Impressum

L'éclairage intérieur – efficacité
énergétique

Editeur: Fachhochschule Nordwest-
schweiz, Institut Energie am Bau

Auteurs: Stefan Gasser, Daniel Tschudy

Direction de projet: Fachhochschule
Nordwestschweiz; Institut Energie am Bau,
Muttenz; Armin Binz, Barbara Zehnder

Révision et mise en page: Faktor Jour-
nalisten AG, Zurich; Othmar Humm,
Christine Sidler

Traduction: Ilsegrit Messerknecht

Lektorat: Werner Ulrich

Cet ouvrage fait partie de la série de publi-
cations spécialisées «Construction durable
et rénovation». Il se base sur les cours du
cursus Master visant à l'obtention d'un
certificat «Energie et construction du-
rable» (www.en-bau.ch), une offre de for-
mation continue de 5 hautes-écoles spé-
cialisées suisses. Cette publication a été
financée par l'Office fédéral de l'énergie
OFEN/SuisseEnergie et la Conférence des
directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK).

Illustration de la page de couverture:
Bâtiment scolaire Leutschenbach à Zurich
(Office cantonal de l'industrie des bâti-
ments)

Commande: A télécharger gratuitement
sous www.energiewissen.ch ou sous
forme de livre auprès de Faktor Verlag,
info@faktor.ch ou www.faktor.ch

Janvier 2013
ISBN: 978-3-905711-16-5

Remerciements

Les entreprises d'éclairage Regent et Zum-
tobel ainsi que l'Office cantonal de l'indus-
trie des bâtiments de la ville de Zurich ont
apporté leur soutien financier à la réalisa-
tion de cet ouvrage.



Stadt Zürich
Amt für Hochbauten



ZUMTOBEL



REGENT
L i g h t i n g

Introduction

Un bon éclairage

Un bon éclairage des pièces a une très grande importance pour le confort d'habitat et de travail. En effet, sous nos latitudes, les gens passent principalement leur temps à l'intérieur des habitations. La lumière du jour ainsi qu'une bonne lumière artificielle augmentent le bien-être et la capacité de concentration. Le présent ouvrage traite de la possibilité de ces qualités créatrices même avec une faible utilisation électrique.

Avec des éclairages efficaces, 80 % des dépenses en électricité peuvent être économisées en comparaison avec des installations classiques. Ceci est possible sans perte de confort visuel, à condition toutefois de réunir les connaissances techniques actuelles, un projet précis et une sélection minutieuse de tous les composants impliqués, donc des lampes, des ballasts et des luminaires ainsi que des composants de commande et de réglage. Le défi pour les architectes et les concepteurs en technique du bâtiment consiste à combiner une haute qualité d'éclairage avec une faible consommation d'électricité.

Un bon éclairage est essentiellement le résultat de conditions spatiales, donc de la géométrie de la pièce, de sa qualité et des couleurs des surfaces environnantes. Ce n'est donc pas un hasard si un ingénieur et un architecte ont co-signé de manière responsable cet ouvrage spécialisé. Une méthode de travail interdisciplinaire permet également d'obtenir de meilleurs éclairages, car le bon éclairage d'une pièce est à la fois une affaire de technique et d'architecture.

Stefan Gasser, Daniel Tschudy

La lumière

1.1 Exploration de la lumière!

Plus de 90 % de nos perceptions se produisent via nos yeux. Pour identifier notre environnement et pour nous orienter, nous avons besoin de la lumière (Illustration 2).

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 XVII^e 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

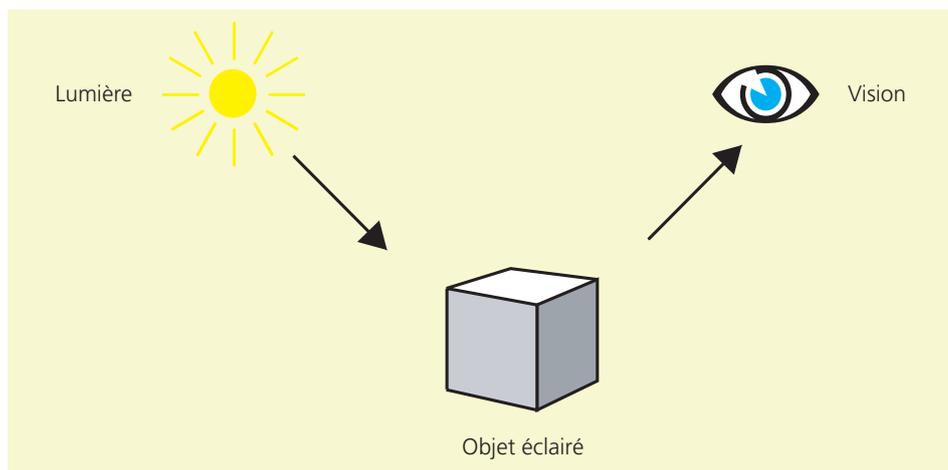


Illustration 1: Lumière, éclairage, vision.



Illustration 2: La galerie des physiciens de la lumière.

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 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 bien 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 3 et Tableau 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

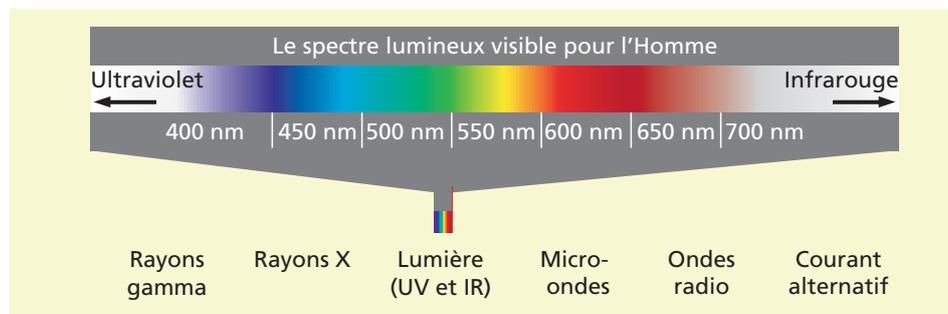


Illustration 3:
La lumière visible
comme onde électromagnétique.

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:
Exemples de rayonnement électromagnétique.

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 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 finie. 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

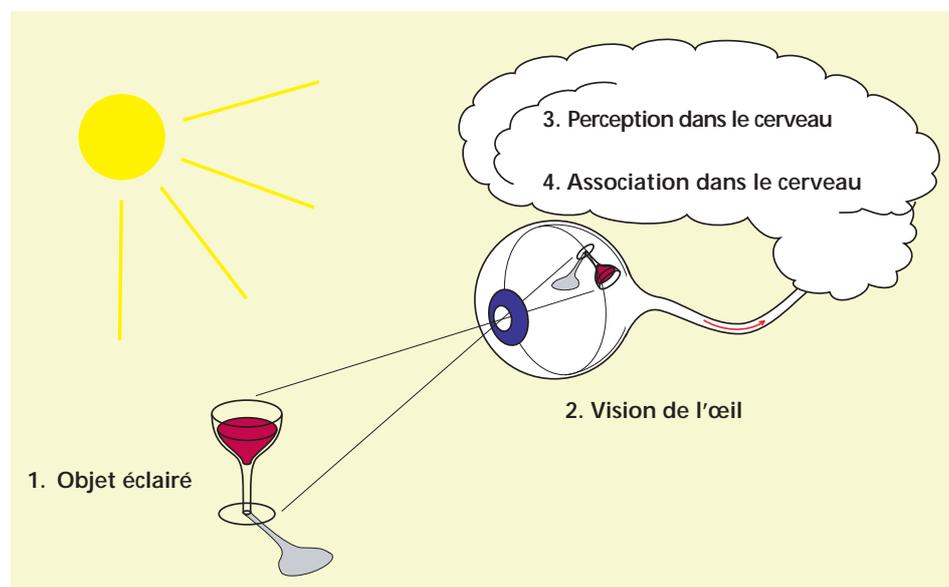


Illustration 4:
Vision et traitement
des images.

rement 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 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 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 photoptique) et de la simple vision nocturne obtenue avec les bâtonnets (valeurs de gris, vision scotoptique), il y a également la vision mésoptique, 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 6, des modifications uniformes dans les in-

formations 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).

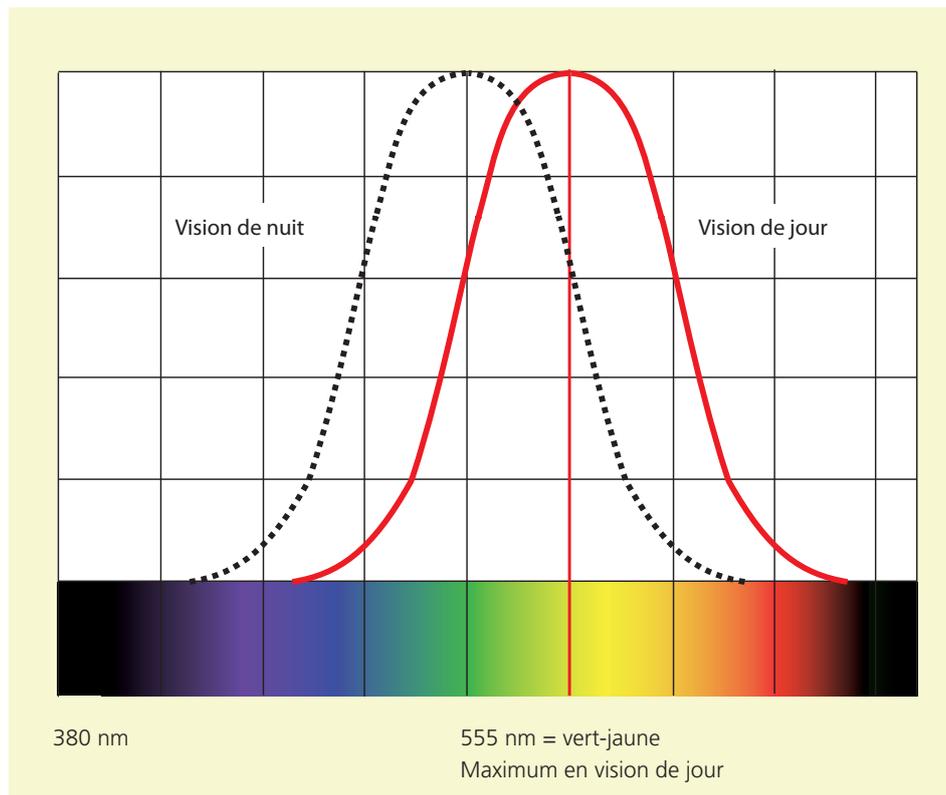


Illustration 5:
Perception visuelle de l'humain pour les différentes températures de couleur.

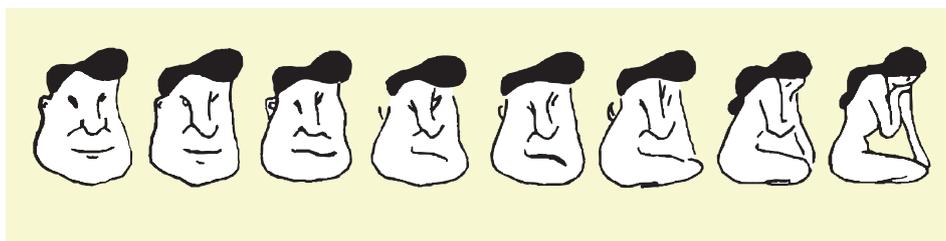


Illustration 6:
Le concept mental se modifie selon l'orientation choisie.

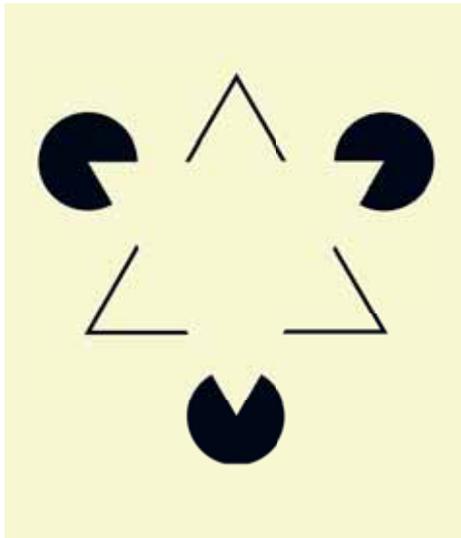


Illustration 7:
Triangle de Kanizsa;
clairement recon-
naissable même en
l'absence de
contours.

■ 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).

■ La perception look-up peut combler des manques d'information en peu de temps.

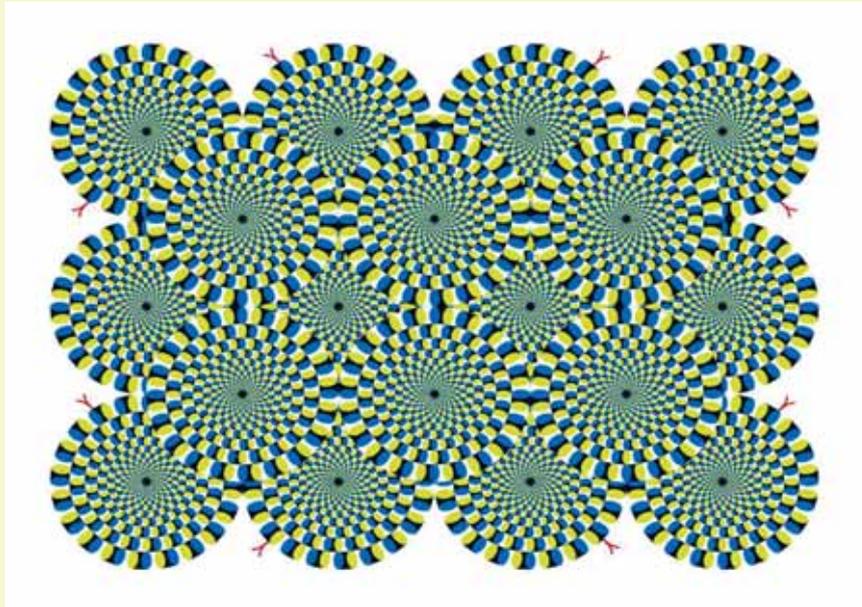


Illustration 8:
Le mouvement
comme prestation
propre du cerveau
est déclenché par
l'inhibition latérale
(renforcement du
contraste des
bords).

Illustration 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

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 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

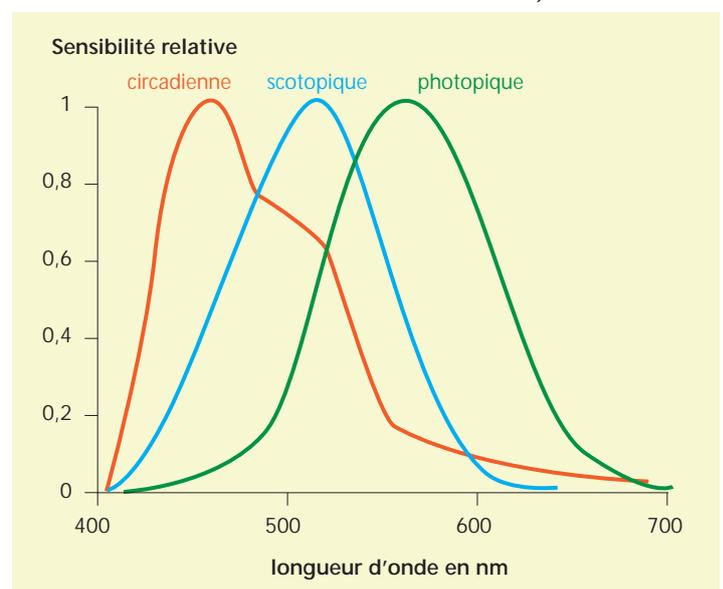
«La lumière des tubes de néons rend malade», le concept mental sur les lampes fluorescentes est relié à un concept sur la santé.

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:

Illustration 10:
Courbes de sensibilité du récepteur dans l'œil.
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).



- 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 ouvertes. 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'hormonium ou le mélatoninium (Illustration 12 et Illustration 13).

1.4 Les termes techniques de la lumière

Les termes élémentaires de l'éclairagisme (Illustration 14) concernent la lumière (flux lumineux et intensité lumineuse), l'éclairage (éclairement 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'éclairement 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).

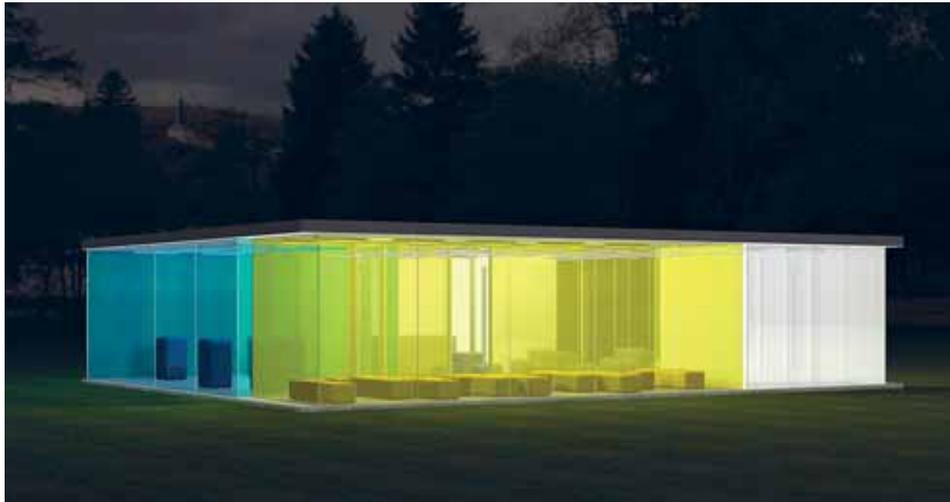


Illustration 11:
Café Split Time de
Philip Rahm 2007.



Illustration 12:
Harmonium de Dé-
costerd & Rahm,
2000.



Illustration 13:
Pièce de mélatonine
de Décosterd &
Rahm, 2000.

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 15). 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 omnirayonnantes). 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 16). 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 indica-

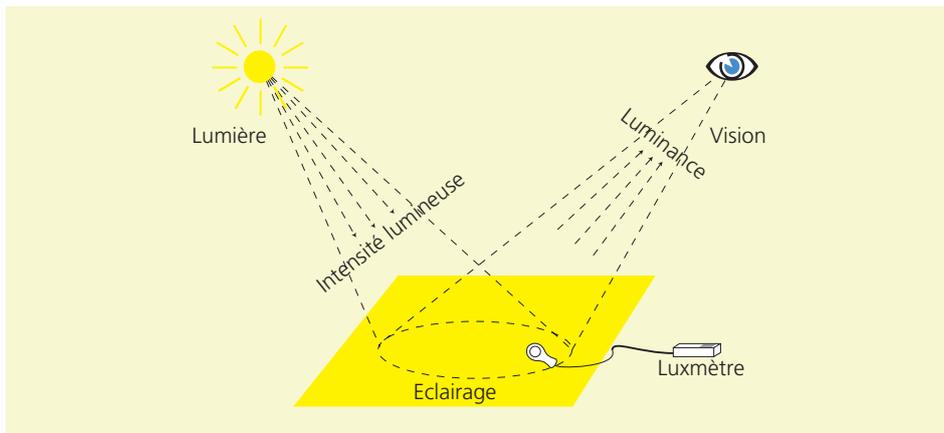


Illustration 14:
Lumière, éclairage
et vision.

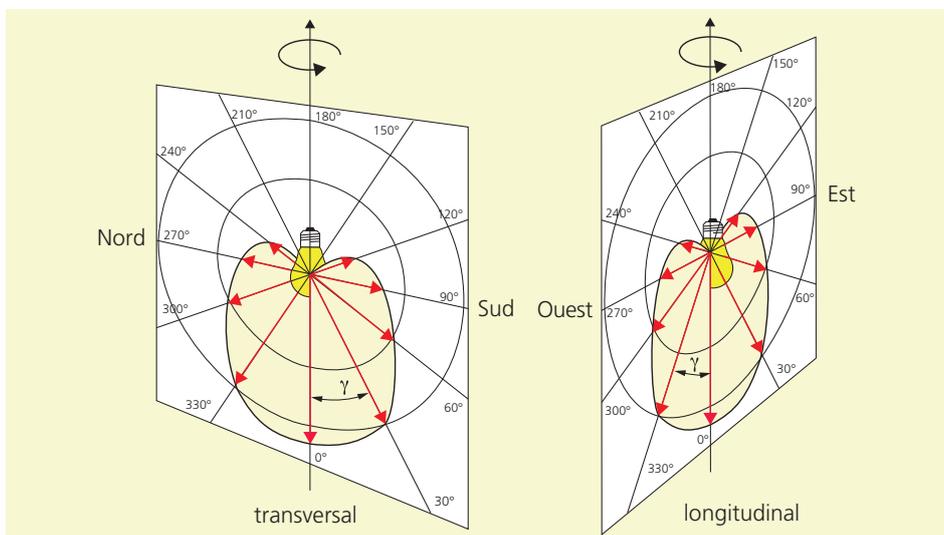


Illustration 15:
Courbe de répartition
de la lumière
d'une lampe à in-
candescence dans le
sens longitudinal et
transversal.

tion précise sur la quantité lumineuse 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 16 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. 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 17). 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 lumen par watt (lm/W). Les lampes à fort

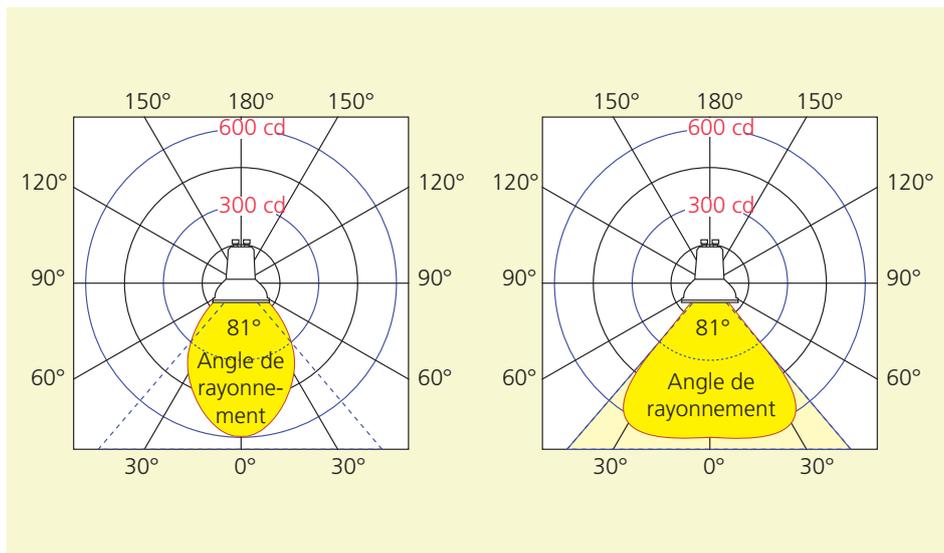


Illustration 16: Même angle de rayonnement – quantité de lumière différente.

Source lumineuse	Intensité lumineuse (cd)
Ver luisant	0,01
Bougie (candela)	1
Lampe à incandescence 100 W	100
Lampe halogène 35 W, 60°	700
Lampe halogène 35 W, 35°	1500
Lampe halogène 35 W, 24°	3000
Lampe halogène 35 W, 10°	10 000
Phare	10 000 000
Soleil	$2 \cdot 10^{27}$

Tableau 2: Intensité lumineuse des différentes sources lumineuses dans la direction de rayonnement principale.

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.

Eclairage lumineux (Lux)

L'éclairage lumineux sert de mesure pour l'évaluation de la luminosité d'une surface. Lorsqu'on mesure sur une table un éclairage lumineux de 500 lux, cela signifie qu'on peut lire un texte de taille normale sans fatigue. Selon la tâche vi-

suelle, 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 éclairages lumineux allant de moins d'un lux (pleine lune) jusqu'à 100 000 lux (plein soleil de midi) (Illustration 18, Tableau 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

Sensibilité

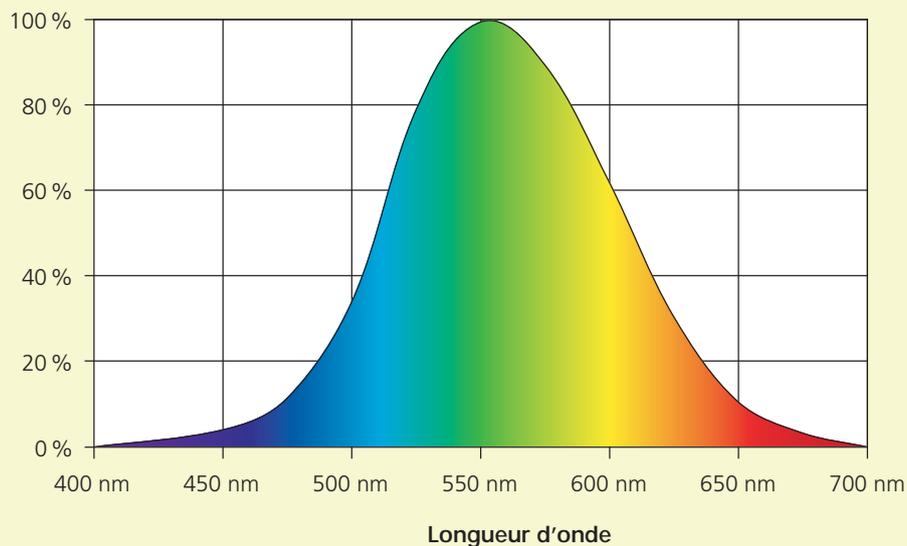


Illustration 17:
Sensibilité de l'œil
humain selon le
spectre visible
(courbe V-lambda).

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 Volt	60	710	12
Lampe halogène Eco	42	630	15
Lampe halogène Eco 12 V	35	860	25
Lampe économique	11	640	58
Lampe LED E27	12	806	67
Tube fluorescent	35	3 650	104
Lampe à vapeur de sodium sous basse pression (éclairage public «jaune-orange»)	180	32 000	178
Soleil	–	$2,5 \cdot 10^{28}$	–

Tableau 3:
Exemples de lampes
et leur flux lumi-
neux ainsi que leur
efficacité lumi-
neuse.

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 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.

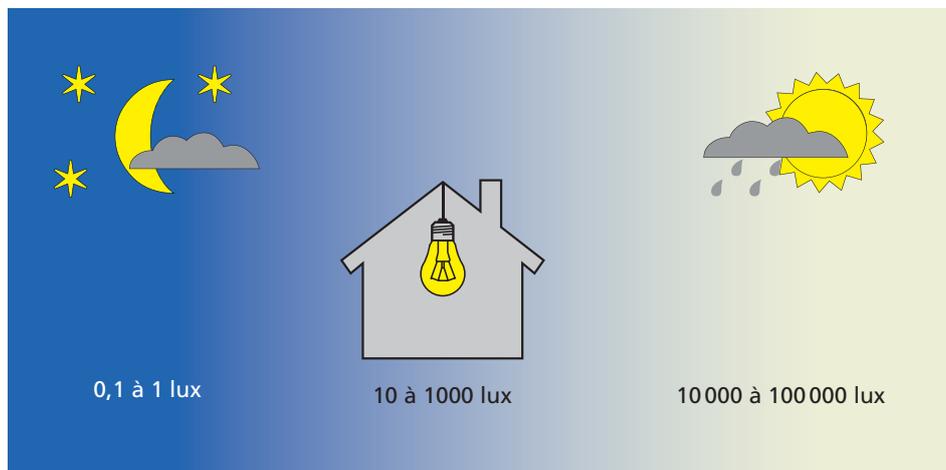


Illustration 18:
Eclairages de sources lumineuses typiques.

Surface d'évaluation (sol, table)	Eclairage lumineux (lux)
Jour d'été sans nuages	100 000
Jour d'été non ensoleillé	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 4:
Exemples d'éclairages lumineux.

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 19)

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 verticalement 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 lumen = surface du cercle unité (rayon 1 m) = 4 x Pi (Illustration 20)

1.5 Le marché de l'éclairage

Bilan énergétique global

En Suisse, 253 térawattheures d'énergie ont été consommés au total en 2010 et pour cela 23,3 milliards de francs ont été déboursés. Les dépenses énergétiques sont classées par agents énergétiques: carburant (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 40 %, constitue le plus gros pourcentage en énergie. Les montants élevés (en millions) pour les coûts énergétiques doivent être relativisés:

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

Tableau 5:
Sources lumineuses
et leurs luminances.

Illustration 19:
Relation entre
l'éclairage lumi-
neux (lux), le flux
lumineux (lumens)
et l'intensité lumi-
neuse (candela)
dans le cas d'une lu-
mière dirigée.

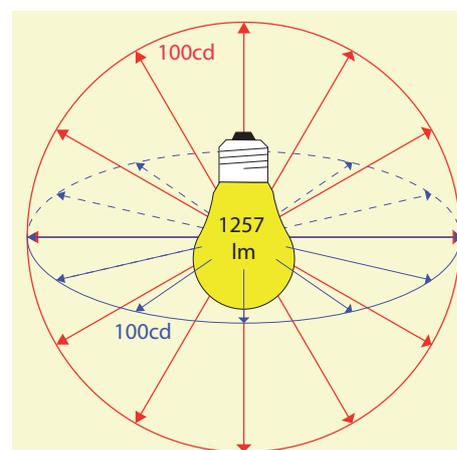
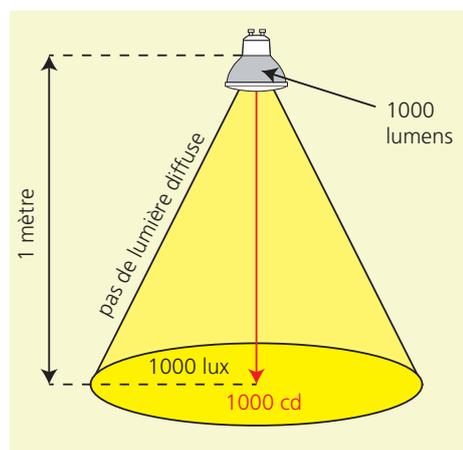


Illustration 20:
Relation entre lu-
men et candela
dans le cas d'une lu-
mière à rayonne-
ment uniforme.

Par personne et par an, seulement 2800 francs sont précisément dépensés pour l'énergie (chaleur, carburant, électricité) en Suisse. L'énergie constitue 5 à 6 % du produit intérieur brut.

Bilan énergétique de l'éclairage

La consommation énergétique pour l'éclairage est principalement déterminée par les lampes. D'autres composants comme les appareils, les réglages et les luminaires sont d'une importance secondaire pour la consommation énergétique. Près de 80 % de toutes les lampes vendues en Suisse proviennent des deux sociétés Osram et Philips. Dans le monde, les trois grands fabricants Osram, Philips et General Electric (GE) commercialisent les trois quarts de toutes les lampes. Les puissances et la durée de vie de toutes les lampes doivent être mesurées et déclarées selon des normes clairement définies. On trouve ces données sur tous les emballages, dans les catalogues et sur Internet. La déclaration est imposée par la loi. Par conséquent, un bilan énergétique relativement exact pour l'éclairage peut être dressé sur la base du nombre de ventes, de la typologie et de la puissance des différentes lampes d'Osram et de Philips. Les statistiques des ventes du fabricant ne sont toutefois pas rendues publiques, les chiffres ne peuvent donc être déterminés que sur la base d'estimations. Parce que les lampes à décharge (les lampes économiques en font également partie) indiquent une bien plus longue durée de vie que les lampes à incandescence

et halogènes, il en résulte une différence prononcée entre les pourcentages de vente et de consommation. Plus des trois quarts de la consommation totale concernent les lampes à décharge. Cela montre clairement que le choix de la lampe, en considérant l'ensemble de la gamme d'utilisation, n'offre qu'un faible potentiel d'économie d'énergie. En revanche, d'importantes économies peuvent être réalisées en augmentant l'efficacité des réflecteurs, du dispositif de fonctionnement, et en optimisant la conception énergétique et naturellement l'exploitation des installations d'éclairage.

Catégories de consommateurs

Le marché de la lumière se divise en trois secteurs qui sont très différents suivant la gamme de produits, les fabricants et les réseaux de distribution.

■ **Bâtiments fonctionnels:** Le marché professionnel est principalement déterminé par les lampes à décharge (surtout les lampes halogènes). Il existe de nombreux modèles, tailles et types de culot. Toutes les lampes à décharge ont besoin d'un ballast qui ne convient en règle générale qu'à un seul ou à quelques types de lampes. Les luminaires sont fournis au client final par les concepteurs et les installateurs et la lampe est la plupart du temps également livrée comme équipement de base. En Suisse, les dix plus grands fabricants de lampes sont organisés en Association des industries de l'éclairage (FVB) et couvrent près de 80 % du marché des lampes. La

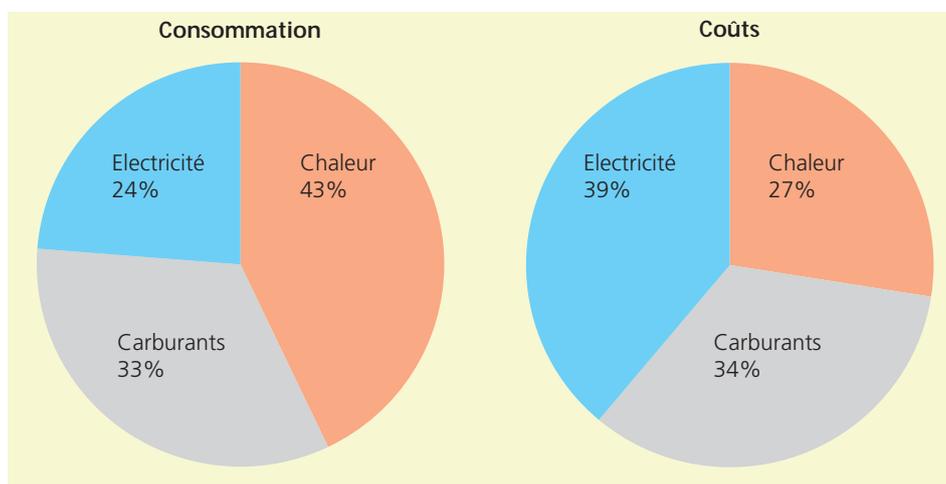


Illustration 21: Parts des agents énergétiques à la consommation d'énergie globale de 253 000 GWh (à gauche) et aux coûts de l'énergie globaux de 23,3 mia. Fr. (à droite) pour l'année 2010. Les taxes ne sont pas prises en compte pour les carburants.

plupart des lampes pour les bâtiments fonctionnels sont produites en Europe.

■ **Ménages:** Le marché des consommateurs est surtout dominé par les lampes à incandescence, les lampes halogènes et les lampes économiques avec les culots à vis ou enfichables bien connus. Les lampes sont principalement distribuées dans les supermarchés et en partie dans les magasins spécialisés. En plus des grands fabricants Osram (fournit les supermarchés Migros) et Philips (fournit les supermarchés Coop), de nombreuses autres sociétés jouent un petit rôle, notamment IKEA qui exploite une grande partie du marché des lampes économiques avec des produits chinois. A la différence du marché professionnel, les lampes proviennent en grande partie d'Extrême-Orient, seules quelques sociétés européennes orientées vers le design possèdent encore une certaine importance.

■ **Eclairage de rue:** L'importance énergétique de l'éclairage public est moindre que ce que l'on pourrait penser de manière subjective. Les besoins énergétiques des lampes de rue sont, contrairement à toutes les autres catégories de consommation, mesurés séparément et indiqués dans les statistiques de l'électricité de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN).

Illustration 22: Nombre (à gauche) et consommation d'énergie (à droite) de lampes vendues en Suisse en 2010, classées par type. Au total, 38 millions de lampes ont été vendues, occasionnant une consommation d'énergie annuelle de 8100 GWh.

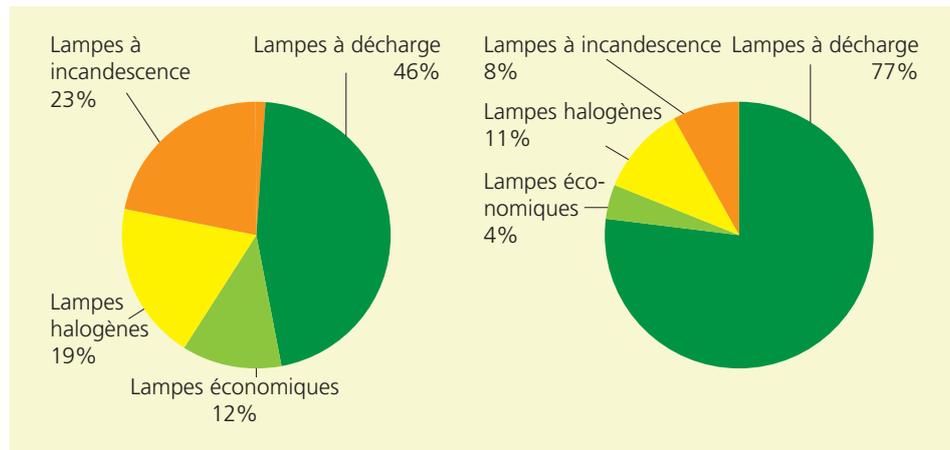
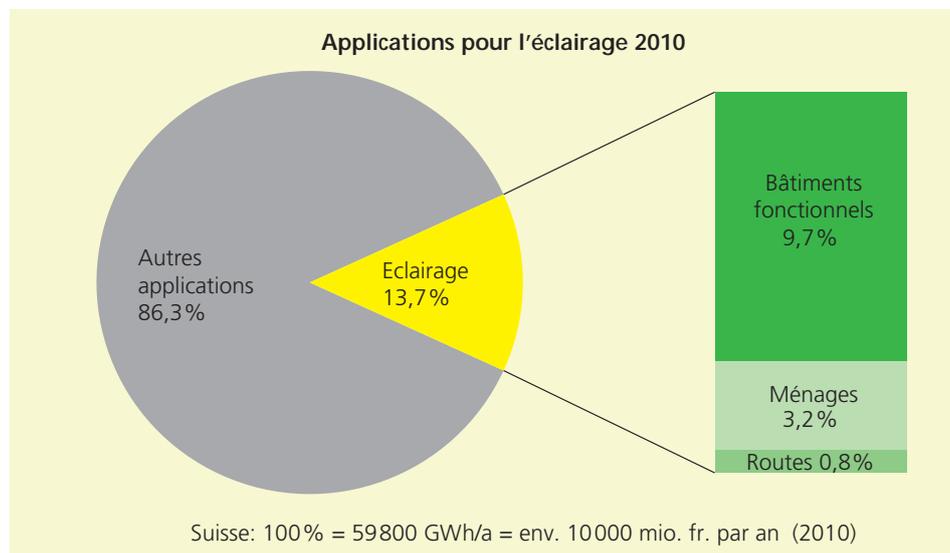


Illustration 23: Parts des catégories de consommateurs à la consommation globale pour l'éclairage, resp. pour la consommation d'électricité de 59 800 GWh (2010). Cette consommation occasionne des coûts à hauteur de 10 mia. Fr.



Evaluation énergétique

2.1 L'étiquetteEnergie

L'étiquetteEnergie 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 (Illustration 24). Par ailleurs, suivant le type de consommateur, d'autres caractéristiques techniques doivent être indiquées. L'étiquetteEnergie doit être placée de manière bien visible au point de vente et être en évidence dans les documents de vente.

L'étiquetteEnergie 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'étiquetteEnergie.

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'étiquetteEnergie est trompeur, pour les lampes également.

Mise en œuvre

L'article 1, alinéa 1 de la directive 98/11/CE de la Commission européenne du 27 janvier 1998 portant sur les modalités d'application de la directive 92/75/CEE du Conseil en ce qui concerne l'indication de la consommation d'énergie des lampes do-

mestiques stipule: «La présente directive s'applique aux lampes électriques domestiques alimentées directement sur le secteur (lampes à incandescence et lampes fluorescentes compactes à ballast intégré) ainsi qu'aux lampes fluorescentes domestiques (y compris les tubes fluorescents et les lampes fluorescentes compactes sans ballast intégré) même lorsqu'elles sont commercialisées pour un usage non domestique». L'étiquetteEnergie pour les lampes domestiques vaut donc pour tout type de lampe, même celles qui sont utilisées dans les services et l'industrie. L'alinéa 2 de la directive 92/75/CEE définit d'importantes exceptions.

- Sont exclues de la directive:
- Les très petites lampes (puissance inférieure à 4 watts)
- Les lampes à forte intensité lumineuse (plus de 6500 lumens, par exemple les lampes torches halogènes de 500 watts)
- Toutes les lampes à réflecteur (donc tous les spots halogènes à basse et à haute tension)
- D'autres produits, moins pertinents

En particulier, l'exception pour les spots a des conséquences négatives car les spots sont utilisés à grande échelle dans les ménages et l'artisanat. L'absence d'étiquette ne permet pas à l'acheteur d'avoir une alternative efficace aux lampes à incandescence et halogènes. La Commission de normalisation européenne compétente et l'industrie se chargent depuis des années déjà de combler ces lacunes, mais en 2011, ils ne se s'étaient pas encore mis d'accord sur une formule commune.

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'effica-

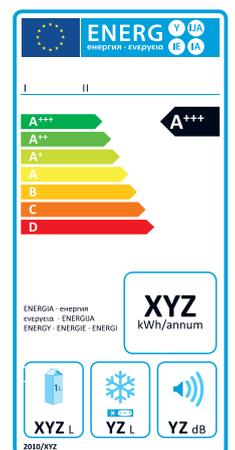


Illustration 24: La chaîne énergétique européenne pour les consommateurs d'énergie.

citée sera attribuée à une valeur donnée en lumen par watt. Plus la puissance est basse, plus l'exigence est faible.

Du tableau 6, il ressort un facteur de 12 dans la fourchette d'efficacité allant de la plus faible à la plus élevée. En d'autres termes, un tube fluorescent de 35 watts diffuse avec la même puissance électrique 12 fois plus de lumière qu'une lampe sofitte (lampe à incandescence en forme de tube). Ces dernières sont du reste utilisées dans les anciennes installations sanitaires ainsi que dans les bars et les restaurants à la mode. Le tableau 6 montre d'autres caractéristiques de l'évaluation de l'efficacité avec l'étiquette Énergie qui gêne fortement la compréhension: les classes ne sont pas linéaires, elles couvrent une vaste palette de sources lumineuses. Par contre, la lampe économique a un statut spécial et est sans exception affectée à la classe A. Une classification plus judicieuse serait celle présentée dans le tableau 7. L'efficacité des spots est un peu plus faible en rai-

son des pertes du réflecteur qui ne devraient cependant pas dépasser 20 %.

2.2 Interdiction des lampes à incandescence

Le 18 mars 2009, la Commission compétente du Conseil européen a adopté la directive 2005/32/CE qui établit la sortie progressive de la technologie des lampes à incandescence. La désignation officielle de l'interdiction des lampes à incandescence est la suivante: «Exigences relatives à l'écoconception des lampes domestiques à rayonnement large». Dans le jargon spécialisé, l'appellation «Directive EUP» est également utilisée, EUP signifiant «Energy using Products» (produits consommateurs d'énergie). En plus des lampes, les exigences portent également sur divers autres produits consommateurs d'énergie (p.ex. blocs d'alimentation, boîtiers d'installation, PC, moniteurs).

Classe	Exemple de lampe	Puissance * (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité (lm/W)
A	Meilleur tube fluorescent 35 W	38	3650	96
	Meilleure lampe LED 6 W	7	650	93
	Lampe économique 11 W	11	640	58
B	Lampe fluorescente compacte 42 W	26	1800	69
	Lampe halogène Eco 12 V 35 W	37	860	23
C	Lampe halogène Eco 52 W	52	820	16
D	Lampe halogène Eco 28 W	28	345	12
E	Lampe à incandescence usuelle 75 W	75	935	12
F	Lampe à incandescence usuelle 25 W	25	220	9
G	Lampe à incandescence en forme de bâtonnet (Linestra)	35	270	8

Tableau 6:
Lampes typiques et classes d'efficacité.

*) Puissance y c. appareils auxiliaires, le cas échéant

Classe d'efficacité	Lampes sans réflecteur (lm/W)	Lampes avec réflecteur (lm/W)	Exemples
Très bonne	> 80	> 64	Tubes fluorescents, LED
Bonne	> 60	> 48	Lampes fluorescentes compactes, lampes économiques, LED
Moyenne	> 40	> 32	Lampes économiques, LED
Insuffisante	> 20	> 16	Halogènes
Mauvaise	< 20	< 16	Halogènes, lampes à incandescence

Tableau 7:
Classification sommaire des lampes.

Tableau 8: Calendrier de sortie des lampes à incandescence usuelles.

Retrait des lampes à incandescence

L'étiquette Energie est la base des exigences d'efficacité énergétique des lampes. Après l'établissement d'une feuille de route, toutes les lampes non comprises dans les classes d'efficacité A et B devront disparaître du marché entre septembre 2009 et 2016 (Tableau 8). L'interdiction des lampes à incandescence comporte quelques compléments et exceptions importants:

■ Les lampes mates devaient être dans la classe A dès le début, le 1^{er} septembre 2009. Comme elles ne correspondaient pas à cette classe, cela signifiait leur disparition immédiate des magasins et des catalogues, à l'exception des lampes économiques et LED. A ce sujet, il faut savoir que les lampes mates à incandescence ne sont pas moins efficaces que les lampes claires. Contrairement à l'argumentation de l'auteur de la directive à ce sujet: les lampes économiques constituent un bon substitut des lampes mates, pour les lampes claires en revanche le remplacement n'est que difficilement possible.

■ Les lampes à réflecteur sont également exclues de l'interdiction. Que ce soient les halogènes basse tension et haute tension, les spots à incandescence normaux ou les lampes sphériques, ils sont toujours autorisés. L'exception s'applique également aux tubes incandescents Linestra.

■ En Suisse, l'interdiction des lampes à incandescence existe également depuis le 1^{er} septembre 2010. Y sont également interdits depuis janvier 2009 les petites lampes à incandescence de 15 et 25 watts.

Obligation de déclaration

La directive EUP pour les lampes comporte, en plus de l'interdiction des lampes à incandescence normales, une obligation de déclaration des paramètres techniques importants. Les indications suivantes doivent à l'avenir 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 chauffe, gradabilité, dimensions et teneur en mercure. Les informations relayées sur Internet devront comporter d'autres indications concernant les lampes:

Date	Interdit	Autorisé
1er septembre 2009	100 watts et plus	Classe énergétique C et mieux
1er septembre 2010	75 watts et plus	
1er septembre 2011	60 watts et plus	
1er septembre 2012	15, 25, 40 watts et plus	
1er septembre 2016	Classes C à G	Classes A + B

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 ampoule.

3 Years/h (hours) = la **durée de vie approximative** en heures et 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 ampoule. Le site www.xyz.yy indique comment éliminer une ampoule cassée par inadvertance.

6 **Rendu des couleurs**: plus la valeur Ra est basse, plus le rendu des couleurs est mauvais, c.-à-d. que les couleurs d'un objet éclairé sont rendues différemment 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, pièces d'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. (Bonne valeur pour les lampes économiques: < 30 secondes).

9 **Cycles de commutation**, indique le nombre de fois qu'une lampe peut être allumée et éteinte. (Bonne valeur pour les lampes économiques: à partir de 75 000 fois).

Illustration 25: Exemple d'une déclaration de produit.

facteur de puissance, facteur de conservation du flux lumineux, rendu des couleurs et recommandations sur l'élimination de la lampe. Grâce à l'obligation de déclaration, il est désormais 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

En plus de l'obligation de déclaration, les lampes sont soumises à des exigences minimales. Ces exigences entrent en vigueur en deux étapes, d'abord pour les lampes économiques (lampes fluorescentes avec matériel intégré), puis pour les lampes à incandescence et les lampes halogènes. Pour les lampes LED, aucune exigence n'est mentionnée dans la directive (Tableau 9).

Explications concernant les différentes exigences

■ **Facteur de durée de vie:** A partir de 2013, les lampes économiques doivent être fabriquées de sorte qu'après 6000

heures de fonctionnement, au moins 70 % des lampes fonctionnent encore (50 % en 2009).

■ **Durée de vie:** La durée de vie minimale des lampes à incandescence et halogènes doit être de 2000 heures de fonctionnement à partir de 2013, lorsque la vente de lampes à incandescence normales sera alors interdite.

■ **Défaillance précoce:** Un maximum de 5 % des lampes peuvent ne plus fonctionner prématurément. Le temps de fonctionnement jusqu'à la défaillance prématurée est défini différemment pour les lampes économiques et les lampes à incandescence. A partir de 2013, les obligations seront plus strictes.

■ **Le nombre de cycles de commutation** indique la fréquence à laquelle une lampe peut être mise sous tension et hors tension jusqu'à ce qu'elle ne fonctionne plus. Ce nombre fluctue énormément dans la pratique: les meilleures lampes économiques peuvent, avec 1 million de commutations, être mises sous tension et hors tension de

Tableau 9:
Exigences pour les lampes économiques et les lampes à incandescence
*RoHS est le sigle de la directive européenne visant à limiter l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les appareils électriques et électroniques.
n.i. = non indiqué

	Lampes économiques		Lampes à incandescence	
	2009	2013	2009	2013
Facteur de durée de vie (après 6000 heures de fonctionnement)	> 0,5	> 0,7	–	–
Durée de vie			> 1 000 h	> 2 000 h
Défaillance précoce (après heures de fonctionnement)	< 5 % (200 h)	< 5 % (400 h)	< 5 % (100 h)	< 5 % (200 h)
Nombre de cycles de commutation			> 4 000	> 8 000
■ Lampes à allumage instantané	> 3 000	> 6 000		
■ Lampes à allumage à chaud	> 10 000	> 30 000		
Temps d'allumage	< 2 s	< 1 s	< 0,2 s	< 0,2 s
Temps d'allumage			< 1 s	< 1 s
■ sans amalgame	< 60 s	< 40 s		
■ avec amalgame	< 120 s	< 100 s		
Facteur de conservation du flux lumineux				
■ après 2000 heures de fonctionnement	> 85 %	> 88 %	–	–
■ après 6000 heures de fonctionnement	n.i.	> 70 %	–	–
Facteur de puissance				
■ inférieur à 25 watts	> 0,5	> 0,55	> 0,95	> 0,95
■ supérieur à 25 watts	> 0,9	> 0,9	> 0,95	> 0,95
Rendu des couleurs	> 80	> 80	100	100
Rayonnement UVA et UVB	≤ 2,0 mW pour 1000 lumen			
Rayonnement UVC	≤ 0,01 mW pour 1000 lumen			
Mercure (RoHS)*	< 5 mg		0 mg	

manière pratiquement illimitée, les moins bonnes atteignent tout juste 3000 commutations (facteur 300). Les chiffres du tableau 9 sont indiqués de manière simplifiée pour des raisons de compréhension: au lieu de 3000 (en 2009), la norme indique «= moitié de la durée de vie» ou «= durée de vie» avec un critère de 6000 heures en 2013.

■ **Le temps d'allumage** désigne la durée qui va de l'actionnement de l'interrupteur à la première diffusion de lumière de la lampe. Pour une lampe économique «Modèle 2009», il faut donc 2 secondes avant que la source lumineuse ne s'éclaire.

■ **Temps de démarrage:** Durée qui suit le temps d'allumage jusqu'à ce que 60 % de la diffusion lumineuse maximale soit disponible. Comme le démarrage est logarithmique, la durée est égale à plusieurs fois 60 % de temps de démarrage jusqu'à 100 % de diffusion lumineuse. Pour les lampes économiques, cela peut durer jusqu'à 15 minutes. L'œil humain perçoit toutefois à peine le changement entre 60 % et 100 %. Les lampes économiques avec amalgame ont besoin d'encore plus de temps pour devenir plus lumineuses. L'amalgame se trouve surtout dans les lampes économiques ayant la même forme que les lampes à incandescence, dans les spots économiques et dans les lampes économiques miniatures pour augmenter la stabilité de commutation et la durée de vie. Les critères «Temps de démarrage» et «Nombre de cycles de commutation» sont opposés d'un point de vue technique. C'est au consommateur de trouver le meilleur équilibre lors de l'achat.

■ **Facteur de conservation du flux lumineux:** Tous les types de lampes perdent en puissance lumineuse avec le temps, le flux lumineux diminue. Avec le facteur de conservation du flux lumineux, on définit le pourcentage de lumière par rapport à la valeur initiale après 2000 heures, respectivement 6000 heures. Cette valeur va jouer un rôle important en particulier pour les lampes LED à très longue durée de vie.

■ **Facteur de puissance:** Grandeur électrique qui indique le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Pour les consommateurs, cette valeur a

peu d'importance, mais c'est le chiffre caractéristique pour l'évaluation de la qualité technique du produit et de la pollution du réseau qui y est liée. Que les lampes économiques inférieures à 25 watts puissent indiquer un facteur de puissance de 0,5 est très problématique du point de vue de l'ingénieur et ne peut être expliqué que d'un point de vue économique.

■ **Rendu des couleurs:** Il indique la qualité de la lumière. L'indice de rendu des couleurs est toutefois une définition relativement superficielle pour la qualité de la lumière. Même avec une valeur de 80, et suivant le contexte chromatique, l'impression subjective peut être faussée. Une évaluation plus exacte du rendu des couleurs est uniquement possible en considérant l'ensemble du spectre visible. Cet aspect revêt une grande importance surtout pour la technologie LED.

■ **Température de couleur:** Aucune spécification n'est donnée concernant ce point. En effet, une température de couleur comprise entre 2500 et 3000 kelvins est caractérisée par blanc chaud, le blanc lumière du jour se situant à 6500 kelvins. Avec les lampes économiques et les LED, toutes les températures de couleur (p. ex. le blanc neutre de 4000 kelvins) peuvent être générées, les lampes à incandescence et halogènes étant toujours blanc chaud.

■ **Rayonnement ultraviolet:** Les mêmes exigences s'appliquent à tous les types de lampes. Pour les LED, le pourcentage UV de la lumière est significativement plus faible que pour toutes les autres lampes. Par conséquent, les LED sont très intéressantes pour l'éclairage des musées et des magasins.

■ **Mercure:** La valeur de 5,0 mg de mercure par lampe économique est définie par la directive européenne 2002/95/CE RoHS destinée à limiter l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les appareils électriques et électroniques (RoHS: Restriction (of the use of certain) hazardous substances). Sans mercure, une lampe économique ne peut pas fonctionner. Mais la quantité de mercure pouvant être réduite, la plus faible teneur en mercure d'une lampe économique est de 1,2 mg environ.

Contribution de l'interdiction des lampes à incandescence à l'économie d'énergie

Quels effets doit-on attendre de l'interdiction des lampes à incandescence sur la consommation énergétique? Grâce à la position quasi monopolistique des géants des lampes Osram et Philips, un bilan relativement précis peut être dressé au moyen des statistiques de la branche (Ill. 26).

■ **De 1998 à 2006:** Forte augmentation de la consommation énergétique pour l'éclairage domestique, dont l'élément déclenchant fut le «boom de l'halogène» où pratiquement aucune lampe à incandescence traditionnelle n'a été remplacée, les lampes halogènes sont arrivées sur le marché comme source lumineuse supplémentaire.

■ **De 2009 à 2012:** Mise en place de l'interdiction des lampes à incandescence, partie 1. Seule la vente de lampes des classes d'efficacité A à D est encore autorisée, celle des classes F à G sont interdites à la vente. Fin 2011, cette première étape a pratiquement été achevée. Selon la législation, le retrait des lampes à incandescence est prévu pour septembre 2012. Cette première étape de l'interdiction des lampes à incandescence a entraîné une économie d'énergie d'environ 300 GWh/an par rapport à 2006, si on y ajoute le peu de ce qui

restera des lampes à incandescence de 2012. Economie d'énergie relative à la consommation électrique totale en Suisse: environ 0,5% (en 2006).

■ **Jusqu'en 2016:** Mise en place de l'interdiction des lampes à incandescence, deuxième partie: seule la vente de lampes des classes A et B est autorisée, à savoir des lampes économiques et LED ainsi que quelques lampes halogènes. Les classes C à G sont interdites. Economie: 950 GWh/an prévus en 2012. Cette économie n'est cependant possible que si les spots sont également inclus dans l'interdiction, ce qui a certes été planifié en 2011, mais n'est pas encore en vigueur.

■ **Après 2016:** Une augmentation de l'efficacité des lampes de la classe A de 30% est possible avec la technologie LED. La définition d'une classe A+ et éventuellement d'une classe A++ serait judicieuse. On pourrait encore économiser 300 GWh/an. Mais les capacités de réduction de la consommation des ménages grâce à des moyens technologiques semblent toutefois atteintes.

Campagne d'économie d'énergie au Japon

Pour les Japonais, la peur de la contamination par le nucléaire de leur pays et le ren-

Consommation d'énergie pour l'éclairage dans les ménages de Suisse selon les classes d'efficacité

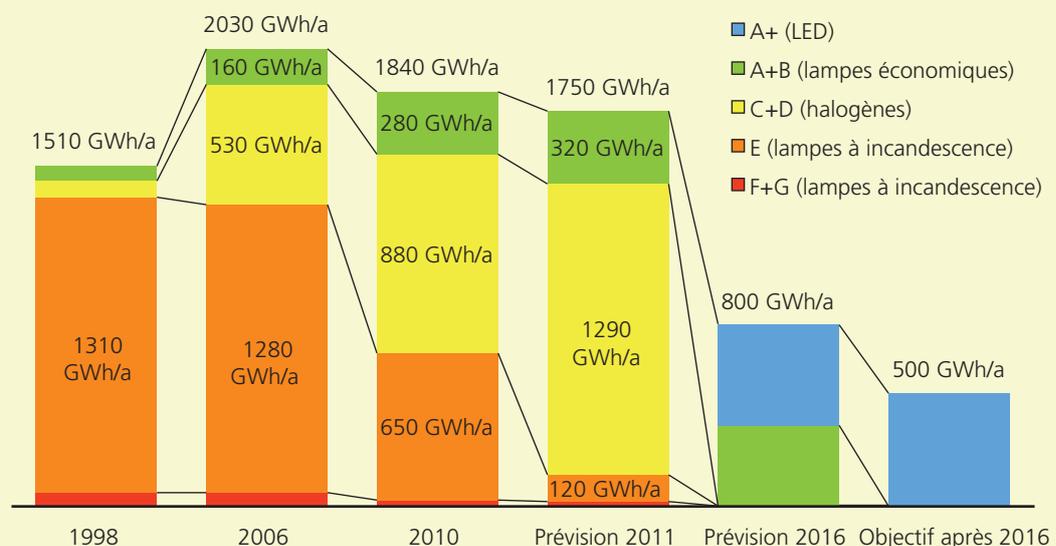


Illustration 26:
Evolution de la consommation d'énergie pour l'éclairage dans les ménages suisses.

forcement des contrôles des denrées alimentaires liés à la catastrophe de Fukushima signifiant que l'électricité doit être strictement rationnée. En fait, le thème des économies d'énergie ne semble pas encore bien ancré dans les mentalités de nombreux Japonais et ce changement radical dépasse plus d'un habitant du pays. Les infographistes proposent comme solution à ce problème des illustrations qui représentent surtout des lampes à incandescence.

2.3 Norme SIA 380/4

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 380/4 (L'énergie électrique



Illustration 27: Campagne japonaise d'économie d'électricité après la catastrophe nucléaire de Fukushima en 2011.

dans le bâtiment). Cette norme SIA 380/4 occupe une place spéciale dans les normes tant suisses qu'européennes. Lorsque la norme est entrée en vigueur en 1995, 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 380/4 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. Avec la SIA 380/4, la procédure et le modèle de calcul sont plus clairement orientés vers la pratique que les nombreuses normes couvrant d'autres normes européennes concernant le thème de «L'énergie électrique dans le bâtiment».

But et objectif de la norme

Parmi la collection de normes de la SIA, figure également la norme SIA 380/4, «L'énergie électrique dans le bâtiment», dont la préface stipule: «La norme SIA 380/4 L'Energie électrique dans le bâtiment a pour but une utilisation rationnelle

de l'électricité dans les bâtiments et les installations et souhaite, en tant qu'aide à la conception, contribuer à optimiser la consommation d'électricité des bâtiments neufs et rénovés. Elle définit les paramètres qui prévalent et établit une description standard des besoins en électricité». La norme comprend quatre chapitres:

- Compréhension (explication des termes)
- Procédure (tâches des participants)
- Méthode de calcul pour les besoins de puissance et d'énergie électriques
- Exigences concernant les installations d'éclairage ainsi que les installations de ventilation et de conditionnement d'air

Compréhension

Les termes les plus importants dans la norme SIA 380/4 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.
- **Partie indice énergétique Eclairage** (MJ/m²): Besoin en électricité de la surface de référence énergétique (de l'ensemble du bâtiment) (1 kWh = 3,6 MJ).

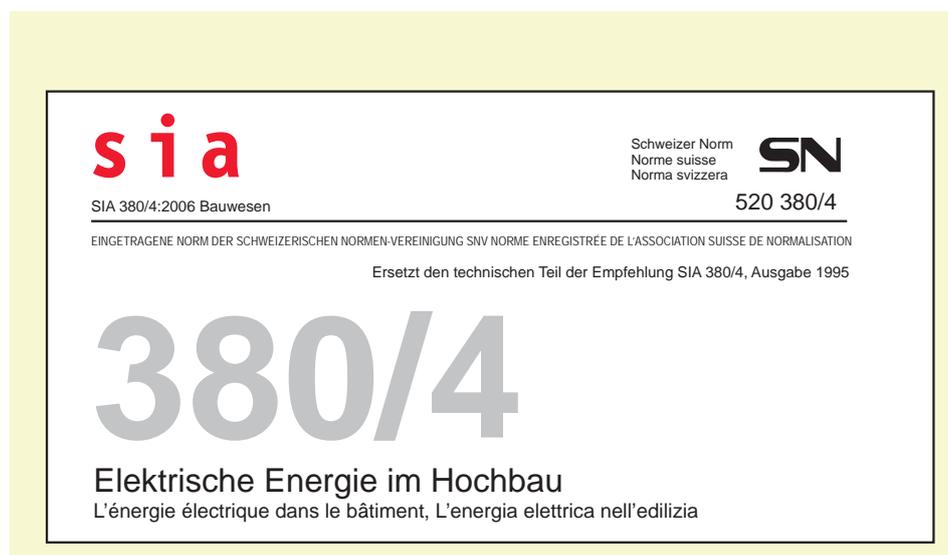


Illustration 28:
Extrait de la page
de garde de la
norme SIA 380/4.

- **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 90% 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 l'art et sont économiques.
- **Les valeurs cibles (kWh/an)** 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 consommation énergétique obtenues avec la méthode de calcul contenue dans la norme.
- **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. L'éclairage ne peut toutefois pas être contrebalancé avec d'autres techniques (p.ex. ventilation ou enveloppe du bâtiment).
- **Exigences individuelles:** Exigences concernant les luminaires composés de la lampe, du dispositif de fonctionnement et du luminaire lui-même. 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'éclairement 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 pendant 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 29). Comme tous les luminaires fonctionnent rarement en même temps, il en résulte un

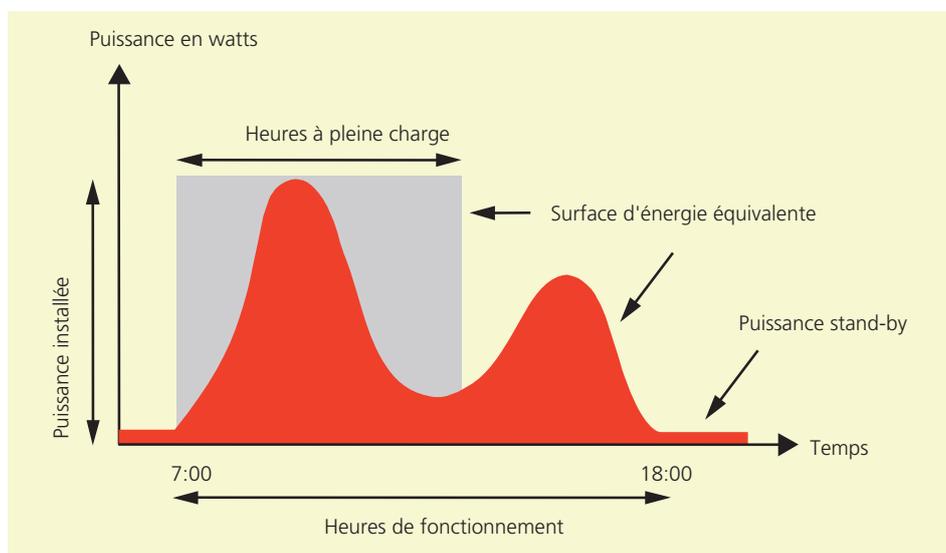


Illustration 29:
Définition des heures à pleine charge.

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 30). 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.

■ **Eclairement lumineux (lux):** Flux lumineux sur une surface définie, par exemple sur la surface d'une table. Dans la norme EN 12464 (Éclairage 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 pour l'éclairage lumineux** sont indiquées 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, évaluation unifiée de l'éblouissement) 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 Söller, 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 point 2.4.

Collaboration des participants

La planification de l'éclairage dans un bâtiment se déroule principalement en triangulaire: le maître d'ouvrage (client), l'architecte et le concepteur d'éclairage (et planificateur-électricien). 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. Ce qui a pour conséquence que le planificateur-électricien doit, à la fin du processus de conception, éliminer les défauts des précédentes étapes

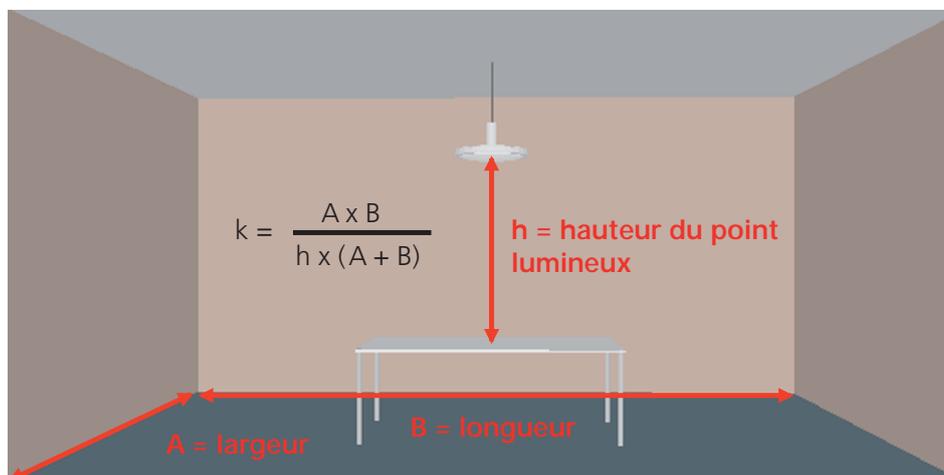


Illustration 30:
Définition de l'indice du local.

au moyen de réglages pour permettre un éclairage efficient (Illustration 31). 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. Dans de nombreux projets architecturaux, les installations de protection solaire (grands stores au lieu de lames orientables) et les fabrications spéciales de

luminaires comme objets d'art constituent des points particulièrement délicats.

■ **Concepteur d'éclairage et planificateur-électricien:** Il doit, si possible, définir le choix des luminaires. En effet, les luminaires optimisés sur le plan technique diffusent en moyenne deux fois plus de lumière que les fabrications spéciales individuelles, ce qui agit directement sur la consommation d'énergie. La régulation de la lumière, correctement planifiée et montée, apporte énormément. Mais il n'est pas rare que l'argent et le temps fassent défaut pour une mise en œuvre professionnelle.

■ **Le planificateur-électricien ou le concepteur d'éclairage** est la plupart du temps compétent pour établir le justificatif énergétique. Lorsque celui-ci ne 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 archi-

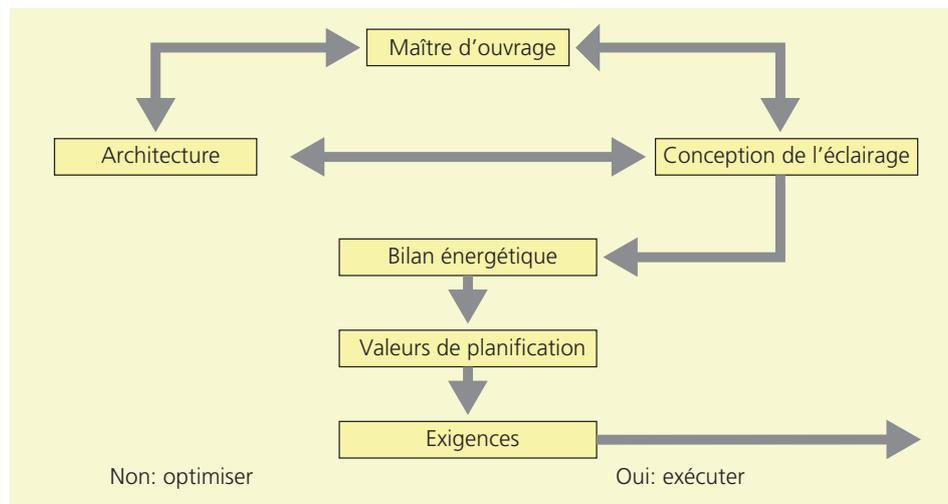


Illustration 31: Collaboration optimale des intervenants au même niveau.

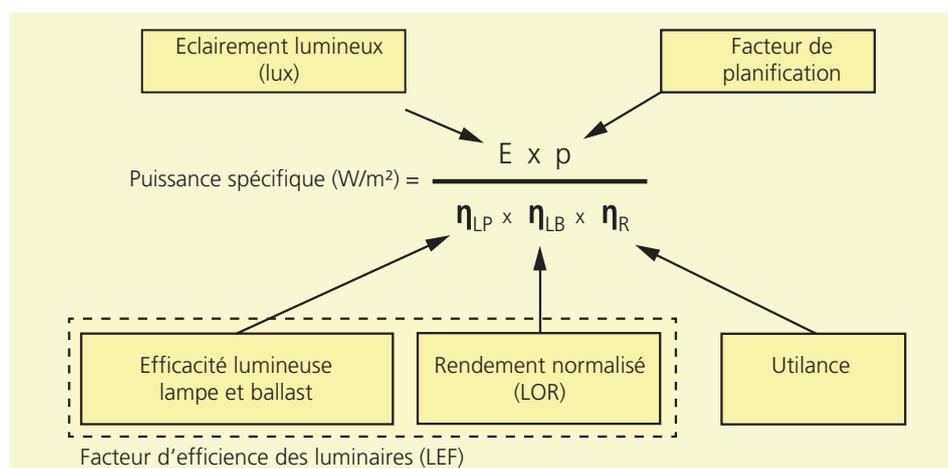


Illustration 32: Calcul de la puissance installée selon la norme SIA 380/4.

tecturale peut encore améliorer l'efficacité de celle-ci. Mais cela ne fonctionne qu'avec une collaboration interdisciplinaire.

Puissance installée

La puissance électrique de raccordement de l'éclairage dans une pièce se calcule au moyen de la formule de l'illustration 32. L'unité W/m^2 résulte du fait que l'éclairage lumineux peut être indiqué en lux mais également en lumen/ m^2 et que l'unité lumen/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 complexes avec les programmes comme Relux et Dialux.

Eclairage lumineux

Les données concernant l'éclairage lumineux sont mentionnées dans la norme SN EN 12464 (Eclairage des lieux de travail intérieurs) pour chaque type de local (Tableau 19 page 41 et Tableau 22 page 45). 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 380/4 ne peuvent pas être adaptées et l'augmentation de l'éclairage lumineux doit donc être compensée par un éclairage efficient.

Facteur de planification

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 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 380/4 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 efficient.

Efficacité lumineuse de la lampe et du ballast

Il est judicieux de formuler en commun l'efficacité de la lampe et du ballast, puisque les lampes (à l'exception des lampes à incandescence) ne peuvent pas du tout être exploitées sans ballast. Le Tableau 36 de la page 63 liste les lampes à incandescence les plus utilisées avec l'efficacité lumineuse du système.

La qualité des ballasts est variable. Dans les anciennes installations d'éclairage, les ballasts traditionnels ou magnétiques qui ont une puissance dissipée allant jusqu'à 30 %

Types de lampe	Puissances des lampes (W)	Classes CELMA, puissances du système (W)						
		A1	A2	A3	B1	B2	C	D
T8 (26 mm)	36	19	36	38	41	43	45	> 45
T8 (26 mm)	58	29,5	55	59	64	67	70	> 70
T5 (16 mm)	35	21	39	42	–	–	–	–
T5 (16 mm)	54	31,5	60	63	–	–	–	–
TC D/E	18	10,5	19	21	24	26	28	> 28
TC LE	55	32,5	61	65	–	–	–	–

Tableau 10:
Classes CELMA pour
ballasts.

de la puissance de la lampe sont encore souvent utilisés. Dans les nouvelles installations, les ballasts électroniques, qui présentent significativement moins de perte, sont utilisés. La CELMA (Fédération des associations nationales de fabricants de luminaires et de composants électrotechniques pour luminaires de l'Union européenne) classe les dispositifs de fonctionnement pour les lampes à fluorescence. Un échantillon de plusieurs combinaisons type lampe-ballast est représenté dans le Tableau 10 selon la puissance des systèmes. Pour les nouvelles installations, seuls les ballasts des classes A1 (graduables) et A2 (non graduables) sont utilisés aujourd'hui. La classification est mentionnée sur les appareils ou dans les catalogues.

■ La classe A1 désigne les ballasts électroniques graduables où l'exigence de puissance pour la variation est définie à 50 % du flux lumineux.

■ Les classes A2 et A3 désignent les ballasts électroniques non graduables.

■ Les classes B1 et B2 désignent les ballasts magnétiques à faibles pertes.

■ Les classes C et D désignent les ballasts magnétiques traditionnels qui sont interdits pour les nouvelles installations depuis 2005.

Le rendement normalisé des luminaires et leur facteur d'efficacité

Dans l'expression «Rendement normalisé des luminaires», il y a le terme «normalisé» qui indique qu'il ne s'agit pas du rendement optique d'un luminaire. Le rendement optique indique plutôt les pertes effectives de la lumière dans le réflecteur. Pour le rendement normalisé, les circonstances veulent que les lampes à fluorescence diffusent différentes quantités de lumière selon leur échauffement. Ce fait peut dans certains cas avoir pour conséquence un rendement normalisé de plus de 100 %, par exemple lorsqu'une lampe atteint un niveau plus efficace.

Le rendement normalisé est mesuré en deux étapes: d'un côté, la lampe sans ré-

	Lampes à décharge	Lampes fluorescentes compactes	LED	Tubes fluorescents
Plafonnier apparent		91 %	100 %	109 %
Plafonnier encastrable		83 %	100 %	93 %
Downlight		81 %	100 %	
Luminaire suspendu		92 %	100 %	101 %
Luminaire sur pied	67 %	98 %	100 %	98 %
Spot	87 %		100 %	
Luminaire de bureau		93 %	100 %	96 %
Applique		78 %		91 %

Tableau 11: Meilleurs rendements normalisés (LOR) de tous les luminaires certifiés Minergie.

	Lampes à décharge (lm/W)	Lampes fluorescentes compactes (lm/W)	LED (lm/W)	Tubes fluorescents (lm/W)
Plafonnier apparent		66 (35)	78	84 (55)
Plafonnier encastrable		66 (35)	81	80 (55)
Downlight		51 (35)	77	
Luminaire suspendu		70 (50)	55	84 (70)
Luminaire sur pied	59 (40)	93 (50)	66	72 (65)
Radiant	71 (40)		58	
Luminaire de bureau		68 (35)	44	67 (55)
Applique		61 (50)		77 (65)

vert = meilleures valeurs par luminaire, entre parenthèses valeurs limites selon SIA 380/4

Tableau 12: Meilleurs facteurs d'efficacité des luminaires (LEF), désignés également par efficacité lumineuse de système, de tous les luminaires certifiés Minergie.

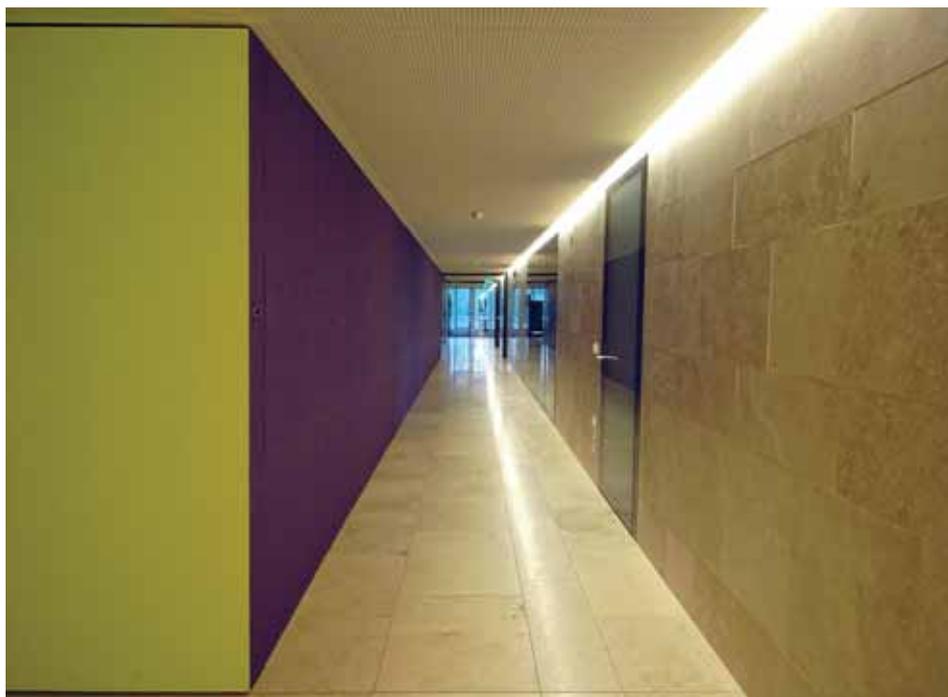
fecteur et de l'autre l'ensemble du luminaire avec la lampe intégrée. Le rapport des deux mesures donne le rendement normalisé du luminaire, «light output ratio» (LOR). Le rendement normalisé (LOR) est donc une grandeur dépendant du luminaire et de la lampe. Par conséquent, même avec un réflecteur identique, le LOR ne peut se transmettre d'une puissance de lampe à l'autre. Le réflecteur peut donc avoir un rendement normalisé de 87 % avec une lampe de 28 watts par exemple et de seulement 81 % avec une lampe de 54 watts, parce que la lampe de 54 watts dégage plus de chaleur dans le luminaire, ce qui diminue la quantité totale de lumière émise. Parce que le rendement normalisé dépend fortement du type de lampe, cette valeur devrait être quantifiée pour un luminaire avec toutes les lampes possibles, ce qui est très laborieux et coûteux. Par conséquent, pour l'évaluation énergétique, il convient de mieux prendre en compte le facteur d'efficacité lumineuse combiné de tous les composants, à savoir de la lampe, du ballast et du luminaire. Le LOR ne pouvant pas être défini pour les luminaires LED, il est par conséquent indiqué avec 100 %.

Explications du tableau 12: A la question de savoir quelle lampe convient le mieux à

quel type de luminaire, la réponse est (champs en vert):

- LED: plafonniers, downlights
- Tubes fluorescents: plafonniers, luminaires suspendus, appliques
- Lampes fluorescentes compactes: luminaires sur pied et luminaires de table
- Lampes à décharge: spots

Il est à noter que les LED se situent en première place dans deux catégories de luminaires souvent utilisés. Bientôt, les spots et les luminaires de table pourraient atteindre des valeurs maximales avec la technologie LED. La comparaison des valeurs les plus élevées avec les valeurs limites de la norme SIA 380/4 indique le potentiel d'économies. Les valeurs limites ont été calculées comme valeurs moyennes de tous les luminaires proposés (Source: Base de données des luminaires Relux, version 2006). En supposant que le pourcentage des luminaires vendus neufs correspond au cadre des quantités de la base de données Minergie, il en résulte un potentiel d'économies de 34 % face à l'offre, ce qui correspond à une augmentation de l'efficacité énergétique moyenne des luminaires de 53 à 81 lm/W. Cette comparaison repose sur l'offre actuelle uniquement. Actuellement, nombre de luminaires anciens (et



*Illustration 33:
Lumières en biais
comme solution
d'éclairage très
inefficace.*

inefficients) sont encore utilisés, le potentiel d'économie énergétique est donc d'autant plus important. Sont à souligner ici deux solutions particulièrement inefficaces concernant les luminaires.

■ Le verre mat rétro-éclairé a souvent un rendement normalisé (LOR) inférieur à 30 %, ce qui correspond, même pour le meilleur choix de lampes, à un facteur d'efficacité des luminaires de seulement 20 à 30 lm/W.

■ Les lumières frisantes (ou «lèche-mur») que l'on rencontre souvent dans les couloirs des hôpitaux et des bureaux ont également une efficacité relative. C'est le plus souvent seulement 10 % de la lumière produite qui est diffusée dans le local, le reste est détruit, noyé dans une fente étroite du plafond.

Utilance

L'utilance d'un local dépend du matériau des surfaces environnantes et de leur couleur. Il ressort clairement du tableau 13 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 reflètera que 50 %. Pour les peintures 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 14).

■ 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.

■ Les propriétés de réflexion du sol sont moins pertinentes pour l'éclairage lumineux utile.

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 34 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 34, 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 34, à droite).

Tableau 13:
Propriétés de réflexion des peintures et matériaux.

Tableau 14:
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 %

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%.

Exemple de calcul

La puissance installée pour un local se calcule selon la formule de l'illustration 32 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 utilances sont indiquées sur l'illustration 34.

Résultat: A équipement égal avec la même efficacité de luminaires, un local sombre a besoin de trois fois plus d'énergie qu'un local clair (Tableau 15). 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 16).

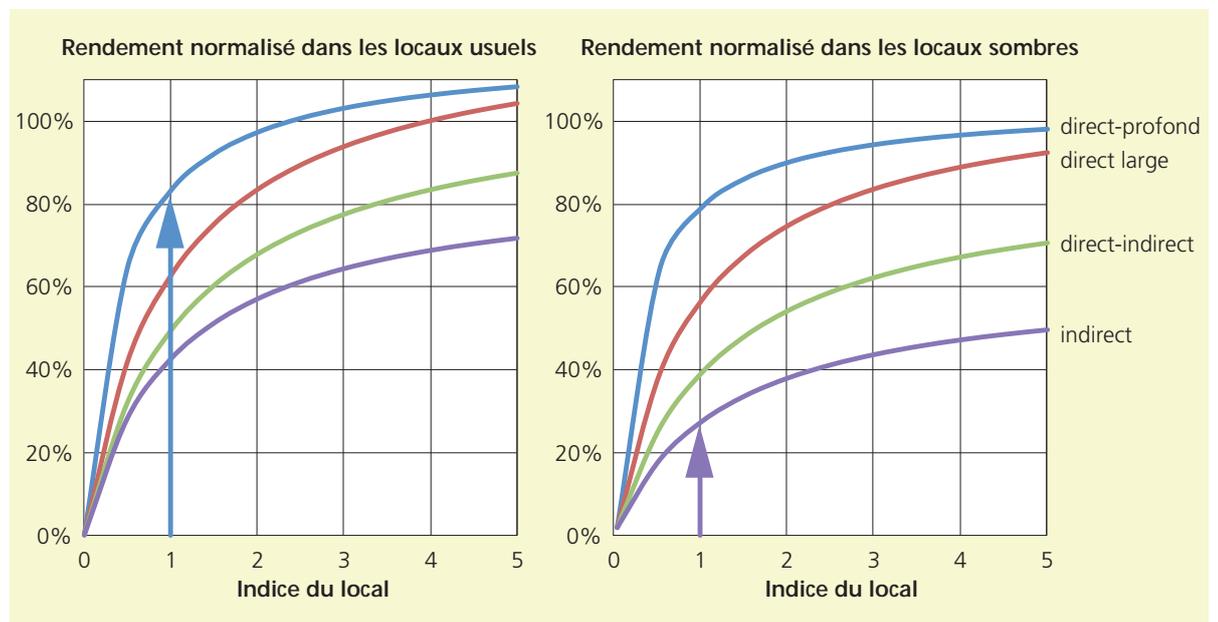
Avec cet équipement, le local sombre a besoin, avec un facteur de 15, de plus d'énergie que le local clair.

Calcul des heures à pleine charge

L'utilisation de la lumière du jour dépend de plusieurs facteurs. Pour le calcul selon la norme SIA 380/4, 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 35).

■ **Surfaces vitrées:** Plus la surface vitrée est grande, plus la lumière du jour peut

Illustration 34:
Rendements normalisés dans un local clair et dans un local sombre.



	Local clair	Local sombre
Grandeur du local	6 m x 6 m x 3 m	
Eclairage lumineux	500 lux	
Facteur de planification	1,25	
Type de luminaire	Rayonnement direct	Rayonnement indirect
Type de lampe	Tube fluorescent	
Efficacité lumineuse de la lampe	90 lm/W	
Rendement normalisé des luminaires	80 %	
Rendement normalisé du local	80 %	25 %
Puissance installée	10,9 W/m²	34,8 W/m²
Calcul	$(500 \cdot 1,25) / (90 \cdot 0,8 \cdot 0,8)$	$(500 \cdot 1,25) / (90 \cdot 0,8 \cdot 0,25)$

Tableau 15:
Exemple de calcul 1
«Puissance installée».

	Local usuel	Local sombre
Grandeur du local	6 m x 6 m x 3 m	
Eclairage lumineux	500 lux	
Facteur de planification	1,25	
Type de luminaire	Rayonnement direct	Rayonnement indirect
Type de lampe	Tube fluorescent	Spot halogène
Efficacité lumineuse de la lampe	90 lm/W	20 lm/W
Rendement normalisé des luminaires	80 %	80 %
Rendement normalisé du local	80 %	25 %
Puissance installée	10,9 W/m²	156,2 W/m²
Calcul	$(500 \cdot 1,25) / (90 \cdot 0,8 \cdot 0,8)$	$(500 \cdot 1,25) / (20 \cdot 0,8 \cdot 0,25)$

Tableau 16:
Exemple de calcul 2
«Puissance installée».

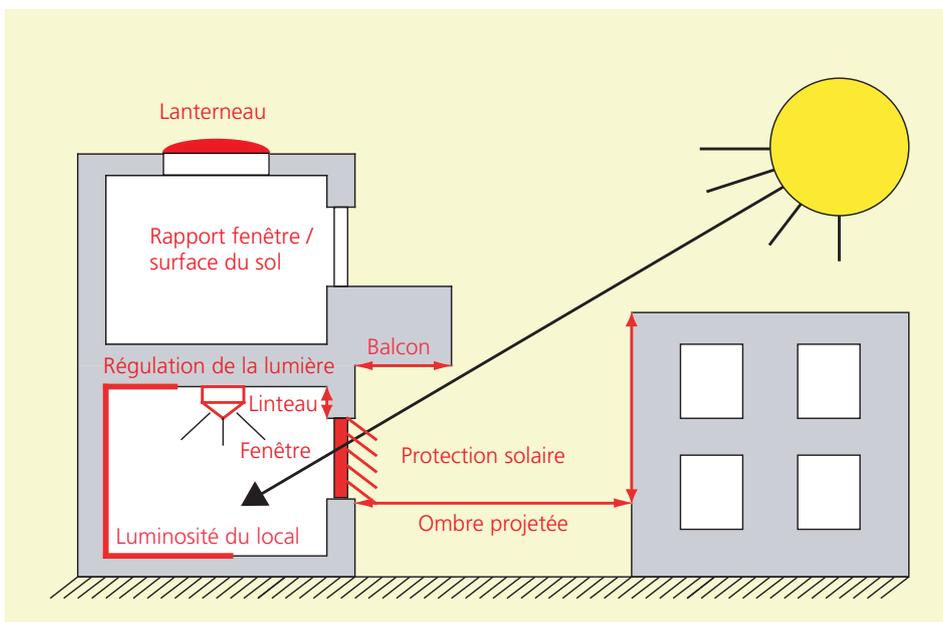


Illustration 35:
Facteurs d'influence
de l'utilisation de la
lumière du jour se-
lon la norme SIA
380/4.

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, parce que les journées d'hiver et le mauvais temps limitent l'utilisation de la lumière naturelle (Illustration 36).

■ **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.

■ **Linteau:** Plus le linteau 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 linteau 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

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 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:** Une protection optimale contre le soleil (niveau de qualité 1) intercepte le rayonnement direct du soleil mais réduit peu l'utilisation de la lumière du jour avec par exemple des stores à lamelles extérieures. Les stores en tissu et les volets roulants situés à l'intérieur offrent une protection solaire insuffisante et gênent considérablement l'utilisation de la lumière du jour (niveau de qualité 3).

■ **Profondeur du balcon:** Un balcon en saillie a le même effet qu'un linteau de fenêtre, à savoir qu'il réduit la profondeur de

Heures à pleine charge par jour

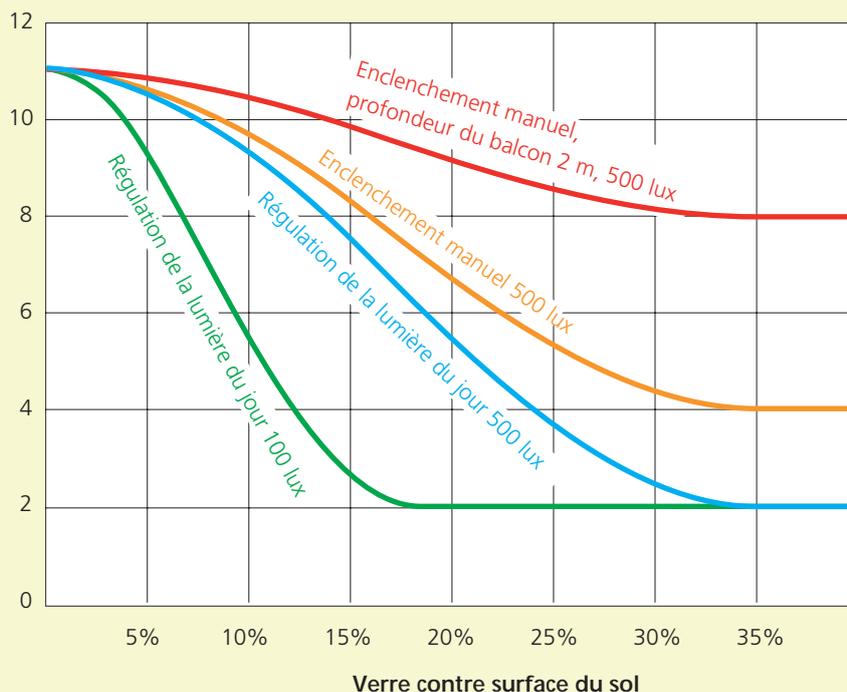


Illustration 36:
Heures à pleine charge d'un éclairage par jour en relation avec le rapport verre contre surface du sol (4 exemples).

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.

■ **Angle de correction:** Les bâtiments environnants situés à une faible distance réduisent la pénétration de la lumière du jour. L'angle de correction est obtenu à partir de la distance entre les bâtiments et de la hauteur du bâtiment voisin par rapport au lieu de l'observateur. Exemple: distance entre bâtiments: 10 m, différence de hauteur du bâtiment: 6 m, ce qui donne un angle de correction de 30 % et une réduction de la lumière du jour de 20 %.

■ **Régulation de la lumière:** 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 souvent 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 380/4 prend en compte le fait que l'équilibre entre lumière du jour et lumière artificielle n'est pas toujours idéal. La norme SIA 380/4 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 bien plus proche de la réalité.

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 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 luminaires, les locaux et l'utilisation des locaux et évaluées sur l'ensemble du bâtiment. Il

s'avère utile de donner des couleurs différentes aux utilisations des locaux (Illustration 37). 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 380/4 (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 17).

Evaluation des besoins énergétiques

Les valeurs calculées pour les besoins énergétiques (Tableau 17) 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 comme valeurs limites et valeurs cibles et sont indiquées non pas pour tout un bâtiment mais pour les différentes utilisations dans le bâtiment (Tableau 18). 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 18 est calculée comme suit:

Valeur du projet = $(15 \times 500 + 20 \times 1000 + 15 \times 500 + 5 \times 500 + 2 \times 500) / 3000 \text{ m}^2 = 13 \text{ kWh/m}^2$. La valeur limite et la valeur cible pour l'ensemble du bâtiment sont calculées de la même manière. Finalement,

c'est la valeur projet de l'ensemble du bâtiment qui est estimée. Dans l'exemple, celle-ci est de 13 kWh/m² entre la valeur cible de 9 kWh/m² et la valeur limite de 20 kWh/m².

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 45 utilisations de pièces différentes (Tableaux 19 à 21).

Valeur limite et valeur cible SIA 380/4

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 19, pour les heures à pleine charge ce sont celles du tableau 20. Comme certaines conditions cadres diffèrent de bâtiment à bâtiment (p. ex. surfaces vitrées ou dimensions des locaux), les

Illustration 37:
Etage typique d'un bâtiment, différencié selon les utilisations.

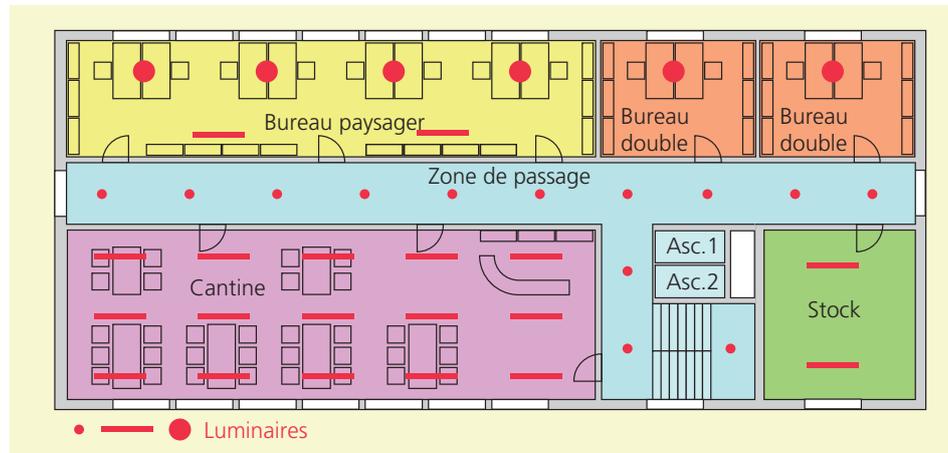


Tableau 17:
Bilan énergétique selon SIA 380/4 (Valeur du projet).

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	10	750	7,5
Bureau paysager	1000	Bureau paysager	16	1250	20,0
Cantine du personnel 4 ^e étage	500	Cantine	7,5	1000	7,5
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		38,0	1013	38,5

Tableau 18:
Bilan énergétique et comparaison des valeurs du projet avec les valeurs limites et cibles.

Groupe de locaux	Surface nette (m ²)	Utilisation	Valeur de conception (kWh/m ²)	Valeur limite (kWh/m ²)	Valeur cible (kWh/m ²)
Bureau double 1 ^{er} – 4 ^e étage	500	Bureau de groupe	15	27	9
Bureau paysager	1000	Bureau paysager	20	31	16
Cantine du personnel 4 ^e étage	500	Cantine	15	11	6
Couloir sous-sol, rez-de-chaussée, étage	500	Couloir	5	15	3
Stock, technique	500	Locaux annexes	2,	6	2
Ensemble du bâtiment	3000		13	20	9

Utilisation standard	Dimensions du local			Hauteur de la surface utilisée (m)	Eclairage lumineux (lx)	Eclairage accentué
	Longueur (m)	Profondeur (m)	Hauteur (m)			
Chambre d'hôtel	4	4	2,5	0,75	50	
Réception d'hôtel/lobby	12	12	4	0,75	100	
Bureau individuel et de groupe	6	6	3	0,75	500	
Bureau paysager	12	12	3	0,75	500	
Salle de conférence	6	6	3	0,75	500	
Hall des guichets/réception	12	12	4	0,05	200	
Salle de classe	10	7	3	0,75	500	
Salle des maîtres/Aire de détente	6	6	3	0,75	300	
Bibliothèque (zone de lecture)	12	12	3	0,75	500	
Bibliothèque (zone de rayonnage)	12	1,5	3	0,75	200	
Salle de conférence	12	12	3	0,75	500	
Salle de classe spécialisée	10	7	3	0,75	500	
Vente meubles	20	20	4	0,05	300	oui
Vente denrées alimentaires	20	20	4	0,05	300	oui
Vente habitat+jardin	20	20	4	0,05	300	oui
Supermarché (alimentaire/non alimentaire)	20	20	4	0,05	300	oui
Commerce spécialisé / centre commercial	20	20	4	0,05	300	oui
Bijouterie	6	6	3	0,05	300	oui
Restaurant	12	12	3	0,75	200	
Restaurant self-service	20	20	3	0,75	200	
Cuisine de restaurant	6	6	3	0,75	500	
Cuisine de restaurant self-service	12	12	3	0,75	500	
Salle d'entretien	20	20	7	0,75	300	
Salle polyvalente	20	20	7	0,75	300	
Halle d'exposition	20	20	7	0,75	300	
Chambre des patients	6	6	2,5	0,05	100	
Local des infirmières	4	4	3	0,05	300	
Salle de traitement	6	6	3	0,05	500	
Production (travail grossier)	20	20	7	0,75	300	
Production (travail fin)	20	20	7	0,75	500	
Stockage, expédition	20	20	7	0,05	300	
Salle de gymnastique (sport scolaire)	24	12	7	0,05	300	
Salle de gymnastique (compétition)	24	12	7	0,05	500	
Salle de fitness	12	12	3	0,05	300	
Piscine couverte	20	20	7	0,05	300	
Couloir	10	2	2,5	0,05	100	
Couloir d'hôpital	10	2	2,5	0,05	200	
Locaux annexes, stock/technique	4	4	2,5	0,05	100	
Salle de bain (habitat)	4	4	2,5	0,05	200	
WC	2	2	2,5	0,05	200	
Douche/vestiaire	6	6	3	0,05	200	
Parking souterrain (public)	20	20	3	0,05	75	
Parking souterrain (privé)	20	20	3	0,05	75	
Buanderie	6	6	3	0,05	300	
Chambre frigorifique	6	6	3	0,05	100	

Tableau 19: Exigences standard SIA 380/4 pour déterminer les puissances installées. On utilise des valeurs typiques pour les dimensions du local; dans le projet, il faudrait si possible utiliser les dimensions effectives pour chaque local typique.

Utilisation standard	Heures du jour (h)	Heures de la nuit (h)	Jours par an (d)	Heures par an (h)	Verre contre surface du sol (%)	Type d'utilisation
Chambre d'hôtel	1	3	365	1460	19 %	SN
Réception d'hôtel/lobby	11	5	365	5840	17 %	SN
Bureau individuel et de groupe	11		261	2871	25 %	NP
Bureau paysager	11		261	2871	13 %	NP
Salle de conférence	6		261	1566	25 %	NP
Hall des guichets/réception	11		261	2871	17 %	SN
Salle de classe	10		261	2610	21 %	NP
Salle des maîtres/Aire de détente	11		261	2871	25 %	NP
Bibliothèque (zone de lecture)	11		261	2871	13 %	NP
Bibliothèque (zone des rayonnages)	10		261	2610	0 %	NP
Salle de conférence	10		261	2610	13 %	NP
Salle de classe spécialisée	10		261	2610	21 %	NP
Vente meubles	11	1	313	3756	10 %	SN
Vente denrées alimentaires	11	1	313	3756	10 %	SN
Vente habitat+jardin	11	1	313	3756	10 %	SN
Supermarché (alimentaire/non alimentaire)	11	1	313	3756	10 %	SN
Commerce spécialisé / centre commercial	11	1	313	3756	10 %	SN
Bijouterie	11	1	313	3756	25 %	SN
Restaurant	6	4	313	3130	13 %	NP
Restaurant self-service	7		313	2191	8 %	NP
Cuisine de restaurant	7	4	313	3443	25 %	SN
Cuisine de restaurant self-service	9		313	2817	13 %	SN
Salle d'entretien	6	4	313	3130	0 %	SN
Halle polyvalente	11	4	313	4695	18 %	SN
Halle d'exposition	11	4	313	4695	11 %	SN
Chambre des patients	11	5	365	5840	21 %	SN
Local des infirmières	11	5	365	5840	38 %	SN
Salle d'examen	11		261	2871	25 %	SN
Production (travail grossier)	11	5	261	4176	18 %	NP
Production (travail fin)	11	5	261	4176	18 %	NP
Halle de stockage, expédition	11	5	261	4176	11 %	NP
Salle de gymnastique (sport scolaire)	10	4	261	3654	29 %	NP
Salle de gymnastique (compétition)	10	4	261	3654	29 %	NP
Salle de fitness	10	4	313	4382	13 %	NP
Piscine couverte	10	4	313	4382	18 %	NP
Couloir	11		261	2871	13 %	SP
Couloir d'hôpital	11	5	365	5840	13 %	SN
Locaux annexes, stockage/technique	4		261	1044	6 %	SP
Salle de bain (habitat)	11		261	2871	6 %	SP
WC	11		261	2871	13 %	SP
Douche/vestiaire	10	4	261	3654	5 %	SP
Parking souterrain (public)	11	4	365	5475	2 %	SP
Parking souterrain (privé)	11		261	2871	8 %	SP
Buanderie	7	3	365	3650	5 %	SP
Chambre frigorifique	1		365	365	0 %	SP

Tableau 20: Exigences standard de la norme SIA 380/4 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 typiques 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 pièce typique. NP: Utilisation normale, SN: Utilisation sensible, SP: Utilisation sporadique

Utilisation standard	Valeur limite SIA 380/4			Valeur cible SIA 380/4		
	Puissance installée (W/m ²)	Heures à pleine charge (h/a)	Besoins en électricité (kWh/m ²)	Puissance installée (W/m ²)	Heures à pleine charge (h/a)	Besoins en électricité (kWh/m ²)
Chambre d'hôtel	3,0	1350	4	2,0	1200	2
Réception d'hôtel/lobby	4,5	3600	16	3,0	2550	8
Bureau individuel et de groupe	16,0	1700	27	11,5	800	9
Bureau paysager	12,5	2450	31	9,0	1800	16
Salle de conférence	16,0	900	14	11,5	450	5
Hall des guichets/réception	8,5	1500	13	5,5	850	5
Salle de classe	14,0	1700	24	10,5	950	10
Salle des maîtres/Aire de détente	11,5	1400	16	8,0	500	4
Bibliothèque (zone de lecture)	12,5	2450	31	9,0	1800	16
Bibliothèque (zone des rayonnages)	13,5	2600	35	9,0	2100	19
Salle de conférence	12,5	2250	28	9,0	1600	14
Salle de classe spécialisée	14,0	1700	24	10,5	950	10
Vente meubles	15,5	3150	49	9,5	2850	27
Vente denrées alimentaires	21,5	3150	68	12,5	2850	36
Vente habitat+jardin	21,5	3150	68	12,5	2850	36
Supermarché (alimentaire/non alimentaire)	27,5	3150	87	15,5	2850	44
Commerce spécialisé / centre commercial	33,5	3150	106	18,5	2850	53
Bijouterie	43,0	2000	86	24,0	1050	25
Restaurant	7,0	2550	18	4,5	1750	8
Restaurant self-service	6,0	1900	11	4,0	1400	6
Cuisine de restaurant	16,0	2550	41	11,5	2050	24
Cuisine de restaurant self-service	12,5	2400	30	9,0	2200	20
Salle d'entretien	11,0	3150	35	7,5	3150	24
Salle polyvalente	11,0	3250	36	7,5	2600	20
Halle d'exposition	11,0	4050	45	7,5	3700	28
Chambre des patients	5,0	4700	24	3,5	3000	11
Local des infirmières	16,5	3800	63	11,5	2650	30
Salle de traitement	18,0	1700	31	13,0	1000	13
Production (travail grossier)	11,0	2950	32	7,5	1950	15
Production (travail fin)	14,5	3350	49	11,0	2400	26
Stockage, expédition	11,5	3600	41	8,0	2700	22
Salle de gymnastique (sport scolaire)	12,5	2200	28	8,5	1200	10
Salle de gymnastique (compétition)	17,0	2300	39	12,5	1350	17
Salle de fitness	10,0	3650	37	7,0	2600	18
Piscine couverte	11,5	3050	35	8,0	1950	16
Couloir	7,0	2200	15	4,5	750	3
Couloir d'hôpital	12,5	5150	64	8,5	4100	35
Locaux annexes, stockage/technique	6,5	950	6	4,0	500	2
Salle de bain (habitat)	11,0	2700	30	7,5	1500	11
WC	15,0	2350	35	10,0	1000	10
Douche/vestiaire	10,0	3500	35	6,5	2050	13
Parking souterrain (public)	3,0	5450	16	2,0	3250	7
Parking souterrain (privé)	3,0	2300	7	2,0	1200	2
Buanderie	13,0	3550	46	9,0	2100	19
Chambre frigorifique	5,5	350	2	3,5	200	1

Tableau 21: Valeur limite et valeur cible selon les utilisations standard, classées selon la norme SIA 380/4.

valeurs limite et cible dans un bâtiment quelconque sont celles découlant du tableau 21.

2.4 Euronorme EN 12464

Norme de base SN EN 12464

Tandis que la norme SIA 380/4 décrit et évalue les exigences énergétiques, la norme EN 12464 fait foi pour les aspects d'éclairagisme. La norme SN EN 12464-1 «Lumière et éclairage – Eclairage des lieux de travail – Partie 1: Lieux de travail intérieurs» constitue la norme principale de base pour les applications lumineuses (SN = norme suisse, EN = norme européenne). Cette norme décrit principalement les cri-

tères 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 39). Il montre l'évaluation d'un luminaire indépendamment de sa position. Les critères limites qui s'y rapportent

Illustration 38:
 Illustration de couverture de la norme EN 12464.

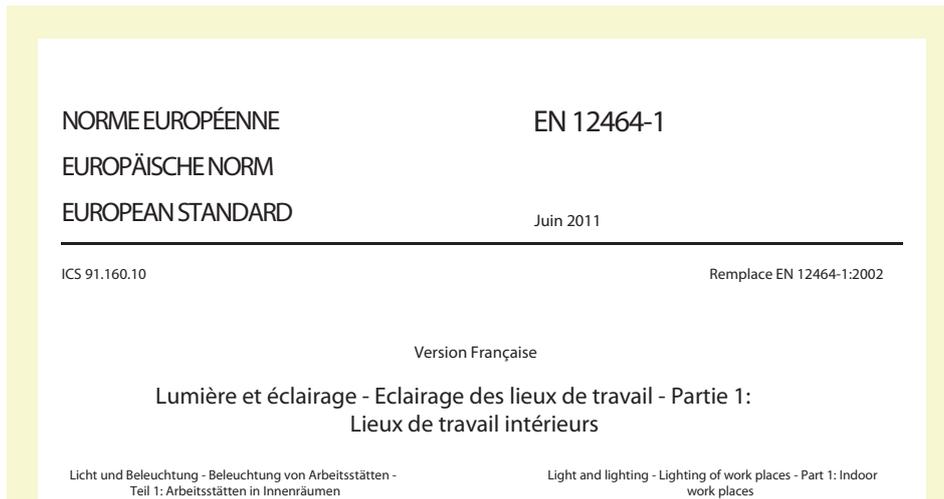
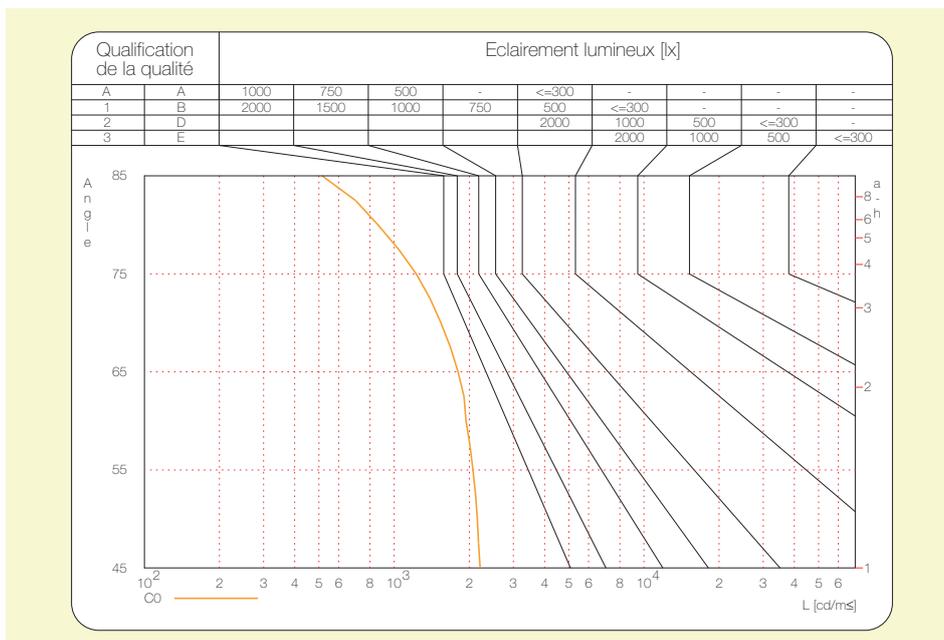


Illustration 39: Procédé de courbes limites selon Söllner (Diagramme de Söllner).



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

sont définis dans la norme DIN 5031-1 «Eclairage avec la lumière artificielle».

Dans la normalisation, le procédé UGR relève du diagramme de Söllner. 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 («lieu de l'observateur»). 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.

Le procédé des courbes limites a été restreint par la structure du local. Mais le procédé UGR est également soumis à des restrictions de 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, «Sr» signifiant stéradian).

Ces limites se justifient par l'influence de la luminance relative aux dimensions de la source d'éblouissement sur les capacités 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 de 0,1 sr 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 corres-

Tableau 22:
Eclairages lumineux selon la norme SN EN 12464.

Tableau 23:
Indice d'éblouissement recommandé selon la norme SN EN 12464 (valeurs UGR).

Tableau 24:
La définition des limites d'éblouissement visuel repose sur la satisfaction de 2/3 des utilisateurs.
LiTG = Lichttechnische Gesellschaft
CIE = Commission Internationale de l'Eclairage
DIN = Deutsches Institut für Normung

pond 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 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 lumineuse 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.

Eclairage intérieur

■ **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

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 15193

September 2007

ICS 91.140.99; 91.160.10

Deutsche Fassung

Energetische Bewertung von Gebäuden - Energetische
Anforderungen an die Beleuchtung

Energy performance of buildings - Energy requirements for
lighting

Performance énergétique des bâtiments - Exigences
énergétiques pour l'éclairage

Illustration 40:
Norme européenne
pour l'évaluation
des bâtiments
(2007).

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 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 («Evaluation 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 (étalonnage) n'étant pas courantes, son utilisation est peu commune en Suisse. Il faut ajouter que l'exigence Minergie est validée par la norme SIA 380/4 et peut être comparée.

La norme constitue une piste importante en ce qui concerne l'utilisation de la lumière du jour qui connaît depuis peu une vraie renaissance. Cette source gratuite de la meilleure qualité lumineuse renferme un potentiel d'économies sans pareil.

2.5 Standard Minergie

Minergie se définit lui-même comme un standard de construction facultatif qui permet une utilisation rationnelle de l'énergie et une mise en œuvre plus large des énergies renouvelables tout en assurant une amélioration de la qualité de vie, une meilleure compétitivité et une diminution des atteintes à l'environnement. Atteindre cet objectif n'est pas toujours facile dans la pratique. C'est surtout dans le domaine de l'éclairage des bâtiments utilitaires que de plus en plus d'objets définis comme Minergie ne répondent pas à tous les critères du label, soit au niveau de l'efficacité énergétique, soit au niveau du confort. A ce sujet, la responsabilité de Minergie sera fortement sollicitée dans les prochaines années, pour arrêter un déclin du label dû à une fragilité et à des abus grandissants.

Chiffres (2011)

- 20 000 bâtiments certifiés – Bâtiments d'habitation: 90 %, bâtiments utilitaires: 10 %.
- Surface totale: 20 millions de m² – Bâtiments d'habitation: 55 %, bâtiments utilitaires: 45 %.
- Constructions avec éclairage Minergie: 2 000 bâtiments utilitaires avec 9 millions de m² de surface.
- 4 standards de bâtiments (combinables entre eux): Minergie, Minergie-P, Minergie-Eco, Minergie-A
- 8 modules Minergie: Fenêtres, cheminées à bois, ventilation de confort, lumi-

nares, protection solaire, installations solaires thermiques, portes, constructions de murs et de toits

■ Les valeurs Minergie (kWh/m²) sont obtenues à partir des calculs des valeurs limites et cibles de la norme SIA 380/4. Elles ne sont valables que pour l'ensemble d'un bâtiment.

Eclairage Minergie

L'éclairage Minergie distingue deux standards: le standard bâtiments et le label luminaires (module). Le standard bâtiments émane de l'exigence système conforme à la norme SIA 380/4. Tous les bâtiments (à l'exception des bâtiments d'habitation) doivent également satisfaire à l'exigence supplémentaire concernant l'éclairage. Cela vaut également pour tous les standards de bâtiments Minergie, Minergie-P, Minergie-Eco et Minergie-A. L'exigence pour l'éclairage Minergie se situe entre la valeur limite et la valeur cible et est calculée selon la formule suivante:

Minergie = valeur cible + (valeur limite – valeur cible) / 4 (Illustration 41).

Le label luminaires se base également sur la norme SIA 380/4 et notamment sur les exigences particulières. Là aussi, les exigences se situent entre valeur limite et valeur cible. Les luminaires Minergie facili-

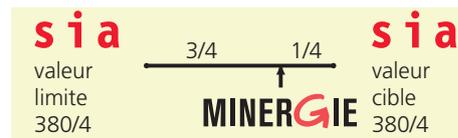
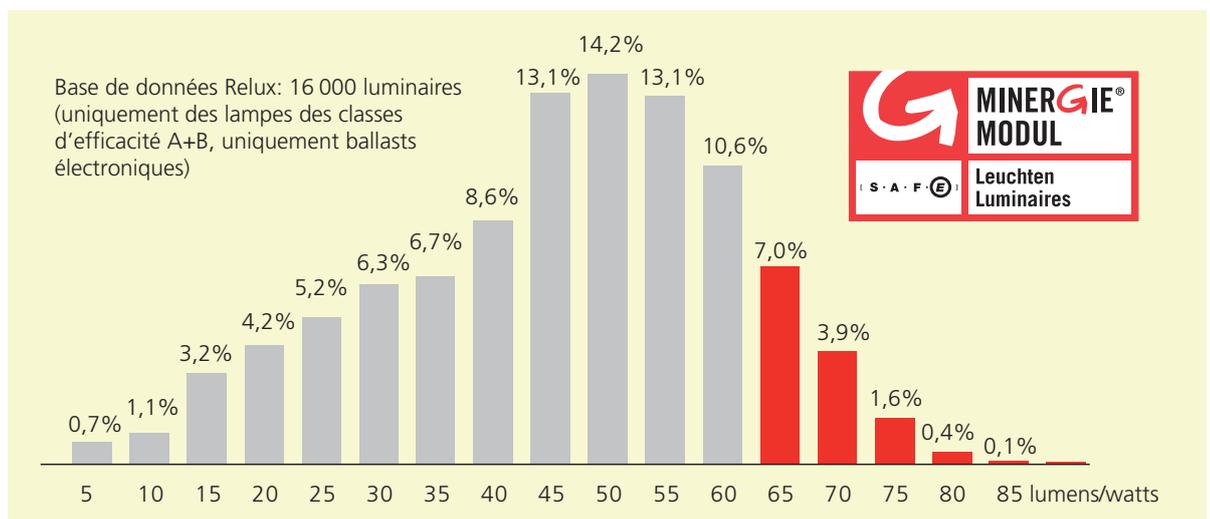


Illustration 41: Définition des exigences Minergie pour l'éclairage entre valeur limite et valeur cible.

Illustration 42: Interprétation de la base de données Relux selon les facteurs d'efficacité des luminaires.



tent la conception d'un éclairage Minergie, mais ne conditionnent pas l'obtention du label bâtiment. Sans une conception minutieuse, les luminaires Minergie ne garantissent pas un bon éclairage (Illustration 42).

Logiciel de calcul ReluxEnergy CH

Un éclairage Minergie ne peut pas être calculé à la main, c'est pourquoi un logiciel de calcul est utilisé. Le justificatif est obtenu avec l'outil informatique Relux en six étapes:

- 1^{ère} étape: Données sur le bâtiment. Personnes responsables du projet, surface, nouvelle construction ou rénovation, état du projet, niveau d'exigence (valeur limite SIA, valeur cible SIA, Minergie)
- 2^e étape: Définition des locaux types. Dimensions du local, classification suivant

les utilisations standard, définition des utilisations spéciales, utilisation de la lumière du jour, régulation de la lumière

- 3^e étape: Relevé des luminaires utilisés. Listage de tous les luminaires et entrée des valeurs caractéristiques spécifiques

- 4^e étape: Comptabilisation des locaux. Enregistrement de tous les locaux dans le bâtiment, classement selon les locaux types, ajout des luminaires définis

- 5^e étape: Justificatif énergétique. Création automatique du bilan énergétique et comparaison avec les exigences

- 6^e étape: Impression. Sélection des pages à imprimer, création d'un fichier PDF.

Le justificatif énergétique avec le logiciel-outil Relux utilisé pour Minergie et pour la norme SIA 380/4 comporte quelques fonctions spéciales qui élargissent considéra-

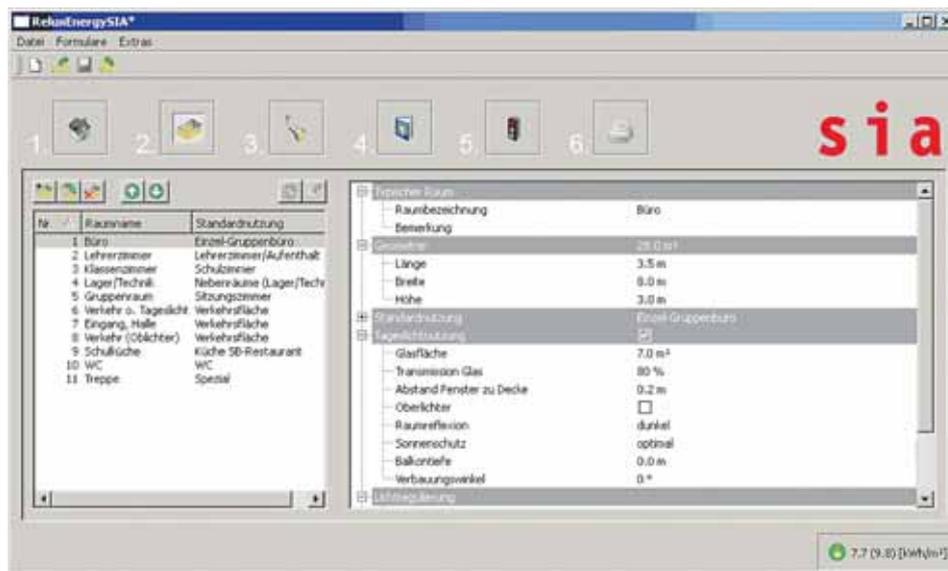


Illustration 43: Masque de saisie du logiciel de justificatif «ReluxEnergy CH».



Illustration 44: Téléchargement d'outils énergétiques sur le site de la SIA.

blement le domaine d'application par rapport aux fichiers Excel utilisés jusqu'ici.

■ L'outil de justification «ReluxEnergy CH» offre la possibilité de combiner les tâches avec le logiciel de planification «ReluxSuite». Les locaux qui ont été simulés et conçus dans ReluxSuite peuvent être directement importés dans le justificatif Minergie et être modifiés en cas d'ajustements ultérieurs.

■ De même, les justificatifs qui ont été élaborés entre 2003 et 2010 peuvent être importés sans effort et continuer à être traités. Dans les masques et les tableaux, on peut dupliquer, déplacer, trier et filtrer, si bien que la tâche est beaucoup plus efficace que dans un tableau Excel figé.

■ L'outil est disponible en allemand, français et italien. Le changement de langue s'effectue en appuyant sur une touche.

Le logiciel peut être téléchargé à partir de trois pages Internet différentes: www.relux.com, www.minergie.ch et www.energytools.ch. Le programme peut être testé avant qu'une licence ne soit nécessaire. Toutes les fonctions, sauf «Sauvegarder» et «Imprimer» sont disponibles en mode essai. La licence peut être achetée soit pour un utilisateur unique (ordinateur relié ou ordinateur non relié à un Codemeter USB) soit comme version serveur (pour plusieurs utilisateurs). Elle est valable un an pour un prix de base de 245 francs.

Conception avec ReluxSuite

La planification de l'éclairage avec ReluxSuite (ou avec le produit allemand Dialux) fait partie du standard de toute planification d'éclairage sérieuse. Le programme est financé par l'industrie européenne des luminaires et est disponible gratuitement sous www.relux.com. ReluxSuite offre une planification d'éclairage détaillée:

■ La base de données en ligne comporte plus de 200 000 luminaires différents d'environ 100 fabricants différents originaires de toute l'Europe. La base de données est continuellement actualisée et élargie.

■ Les locaux peuvent être agencés individuellement avec des centaines de matériaux, meubles, portes, fenêtres et luminaires différents. Les locaux peuvent être représentés en deux ou trois dimensions et orientés dans toutes les directions.

■ L'éclairage peut être conçu de manière automatique ou individuelle.

■ En appuyant sur une touche, la répartition lumineuse du local est simulée et visualisée de différentes manières: tableaux, graphiques Isolux, représentations 3D en pseudo-couleur ou rendu photoréaliste.

■ Pour des résultats encore plus professionnels, on peut importer des plans CAD et l'éclairage directement dans les plans de l'architecte.

■ Le programme comprend également l'éclairage extérieur et celui des tunnels.

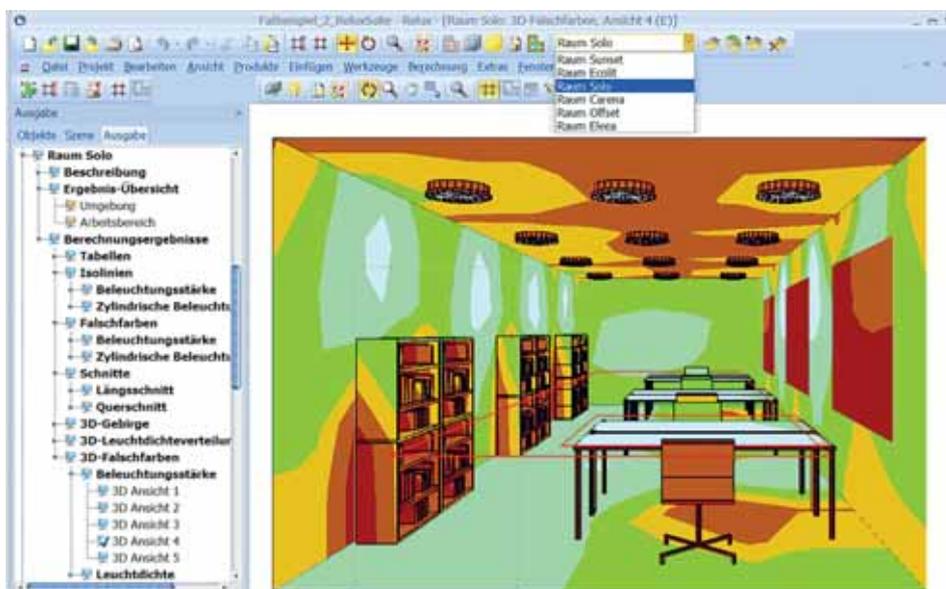


Illustration 45: Capture d'écran du logiciel ReluxSuite.

ReluxSuite possède toutefois un inconvénient: Le programme est trop complexe pour des tâches de conception simples. Une formation est indispensable.

2.6 Liste de contrôle d'éclairage pour les bâtiments utilitaires

Pour évaluer un éclairage existant dans un bâtiment, la liste de contrôle d'éclairage est très bien décrite ci-dessous. La base de ce contrôle constitue la norme SIA 380/4. Le bilan énergétique permet une comparaison avec des valeurs de référence de la norme SIA 380/4 et donc une estimation du potentiel d'économies.

Procédé

1. Sélection des locaux types
2. Saisie des luminaires et des lampes
3. Mesure de l'éclairement lumineux
4. Evaluation de la situation de la lumière du jour

5. Vérification de la régulation lumineuse
6. 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 (Illustration 46). 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 25:
Surfaces
d'éclairement pour
locaux types selon
l'utilisation et total
pour le bâtiment.

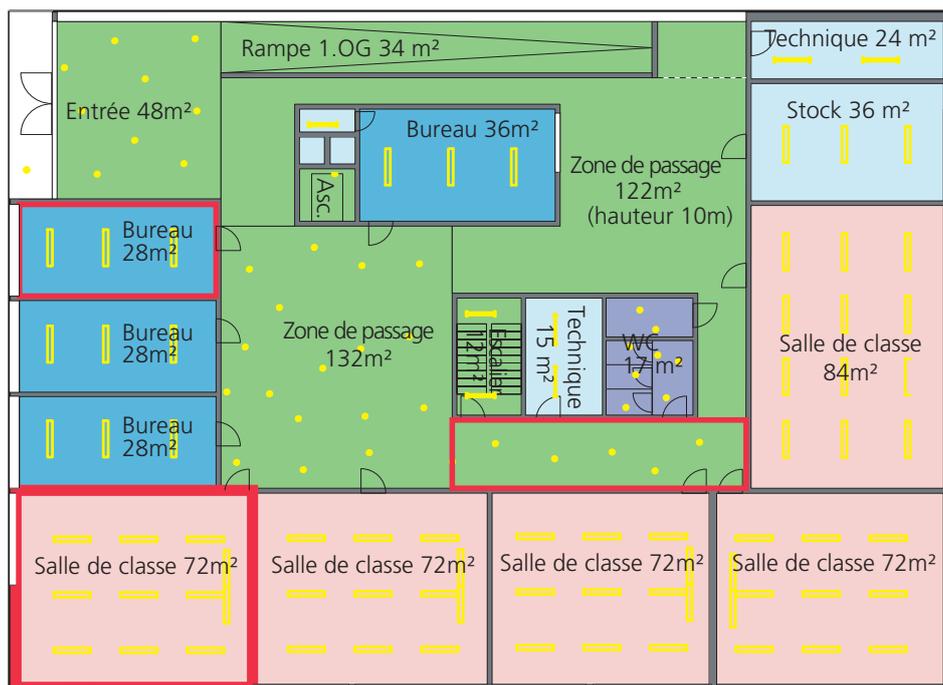


Illustration 46: Ensemble d'un bâtiment scolaire avec marquage des utilisations et locaux types.

Saisies des luminaires et des lampes

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

Remarques concernant le tableau 26

■ **Équipement:** Nombre de lampes par luminaire et puissance déclarée des lampes sans ballast

■ **Puissance du système:** En plus de la puissance des lampes, il faut également relever la puissance du ballast. La puissance dissipée se situe entre 5 et 20 % de la puissance de la lampe. La plupart des fabricants de ballasts en indiquent la puissance dissipée sur leur site Internet.

La puissance spécifique peut être comparée avec les valeurs correspondantes de la norme SIA 380/4. Les exigences dépendent de l'indice du local. Elles sont inverse-

ment proportionnelles, qu'il s'agisse de grands locaux aux exigences moindres ou de petits locaux. La raison en est le pourcentage de la surface murale: plus elle est grande, plus la lumière est absorbée par les murs et n'est plus réfléchiée dans la pièce. L'indice du local s'obtient avec la formule suivante:

$$\text{Index du local (k)} = \frac{\text{hauteur} \times \text{largeur}}{(\text{h local} - \text{h table}) \times (\text{hauteur} + \text{largeur})}$$

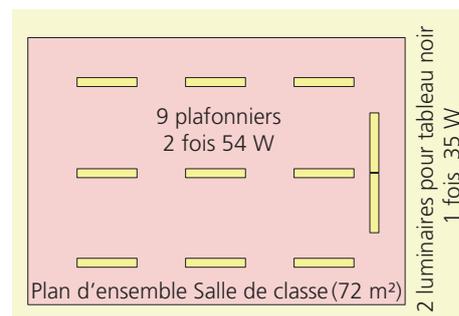


Illustration 47:
Salle de classe type
avec plan des installations.

Tableau 26:
Bilan des puissances
et des exigences de
la norme SIA 380/4
posées à la puissance
installée
d'une salle de classe
type.

	Équipement	Puissance du système	Nombre de luminaires	Total
Type de luminaire 1	2 fois 54 W	122 W	9	1098 W
Type de luminaire 2	1 fois 39 W	42 W	2	84 W
Puissance installée				1182 W
Surface				72 m²
Puissance spécifique				16,4 W/m²
Valeur limite				14,0 W/m²
Valeur cible				11,5 W/m²
Indice du local				2

Mesure de l'éclairage lumineux

L'éclairage lumineux (horizontal) dans un local sombre se mesure à différents endroits avec un luxmètre (Illustration 48). 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.

■ 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 49).

■ 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 380/4 (L'énergie électrique dans le bâtiment).

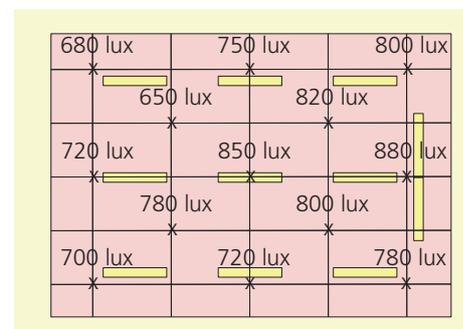


Illustration 48
(à gauche): Lux-
mètre pour mesurer
l'éclairage lumi-
neux.

Illustration 49
(à droite): Grille de
mesure pour l'éclai-
rage lumineux.

Tableau 27:
Exigences EN 12464
et norme SIA 380/4
relatives à
l'éclairage lumi-
neux.

	Eclairage lumineux en lux			Uniformité
	Moyenne	Minimum	Maximum	Minimum vers maximum
Salle de classe	750	650	750	0,74
Exigence	500	–	–	au moins 0,5

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 la surface vitrée, de la transmission lumineuse du verre et du type de protection solaire. Le procédé présenté ici est une simplification appropriée du modèle d'éclairage selon SIA 380/4 et recommandée pour la liste de contrôle d'éclairage (Tableau 28).

Pour l'évaluation globale de la situation de la lumière du jour, l'estimation la plus faible fait foi pour les trois facteurs.

■ **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.

■ **Transmission de la lumière par le verre:** Quel pourcentage de la lumière rayonnante pénètre dans le local? Quelle est la quantité réfléchie? Le coefficient de transmission est une valeur caractéristique déclarée des vitres. Les vitrages solaires sont souvent utilisés comme alternative aux installations de protection solaire.

■ **Type de protection solaire:** 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.

Tableau 28:
Grille simple pour
l'évaluation de
l'utilisation de la lumière du jour.

Illustration 50:
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

Situation de lumière du jour	Verre contre surface du sol	Transmission de la lumière par le verre	Type de protection solaire
Bonne	supérieure à 25 %	supérieure à 70 %	Stores à lamelles claires placés à l'extérieur (stores vénitiens), réglables électriquement ou mécaniquement
Moyenne	15 % à 25 %	50 % à 70 %	Stores en tissu à lamelles sombres, imperméables à la lumière (placés à l'extérieur ou à l'intérieur) ou protection solaire intégrée dans la construction (fixe)
Faible	inférieure à 15 %	inférieure à 50 %	Stores en tissu perméables à la lumière, placés à l'extérieur ou à l'intérieur, ou rideaux, volets roulants ou volets
Pas de lumière du jour	0 %	–	–



Vérification de la régulation lumineuse

Les heures effectives à pleine charge d'un éclairage dépendent de l'utilisation individuelle et ne peuvent par conséquent être déterminées que sur le plan qualitatif. Les valeurs de référence selon la norme SIA 380/4 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 lumineuse et de l'utilisation.

Les chiffres du tableau 29 indiquent une quantification simplifiée en comparaison avec la norme SIA 380/4. Les chiffres sont valables pour des objets ayant un temps d'utilisation annuel type de 2750 heures (correspond à 250 jours à 11 heures/jour). Par ailleurs, ces chiffres se basent sur les éclairages ayant une régulation dépendante de la lumière du jour et de la présence. (Pour les locaux sans lumière du jour, seule la régulation dépendante de la présence est pertinente).

■ **Utilisation sporadique:** Dans le tableau, le premier nombre d'heures à pleine charge de la fourchette vaut pour les surfaces à utilisation sporadique, par exemple WC, vestiaire, entrepôt, surfaces d'aménagement pour les utilisations annexes.

■ **Utilisation régulière:** Le deuxième nombre d'heures à pleine charge du ta-

bleau vaut pour les pièces à utilisation régulière, par exemple bureau, salle de classe, surfaces à aménager pour les utilisations principales.

■ **Commande manuelle:** L'éclairage est allumé et éteint à la main via des interrupteurs.

■ **Régulation automatique:** L'éclairage est régulé de manière entièrement automatique via la régulation de la lumière constante ou avec la commutation Marche-Arrêt. L'expérience montre que les régulations lumineuses qui règlent progressivement le niveau lumineux en fonction de la lumière du jour ne sont pas plus efficaces sur le plan énergétique que les commutations Marche-Arrêt. Ceci s'explique par la consommation en mode veille de la régulation de la lumière constante et du procédé de régulation, la plupart du temps non idéal, dans la pratique.

■ **Régulation semi-automatique** (éteindre automatiquement, allumer manuellement): c'est la régulation semi-automatique qui fournit un gain maximal en efficacité. Cela signifie que la lumière s'éteint automatiquement en fonction de la lumière du jour et de la présence mais qu'elle doit être allumée à la main.

Utilisation de la lumière du jour	Enclenchement manuel (h/a)	Enclenchement automatique (h/a)	Régulation semi-automatique (h/a)
Bonne	500 – 1000	300 – 600	250 – 500
Moyenne	1000 – 1500	600 – 1200	500 – 1000
Faible	1500 – 2000	900 – 1800	750 – 1500
Pas de lumière du jour	2000 – 2750	1100 – 2200	1000 – 2000

Tableau 29: Heures à pleine charge pour différentes utilisations de la lumière du jour et procédure de régulation dans les bâtiments administratifs.



Illustration 51: Types de détecteurs de présence (généralement en combinaison avec un capteur de lumière du jour).

Elaboration du bilan énergétique

Les valeurs calculées pour un local type sont comparées aux valeurs de référence et un bilan énergétique avec le potentiel d'économies est élaboré (Tableau 30).

■ **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 de dépenses 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 31 et 32.

2.7 Assurance qualité efficacité énergétique

Pour que les potentiels d'efficacité élevés de l'éclairage professionnel puissent être réalisés dans les bâtiments utilitaires, les conceptions doivent être complétées par une assurance qualité. Le contrôle complet de l'éclairage fait également partie de l'assurance qualité pendant la phase d'exploitation.

Tableau 30: Economie d'énergie dans une salle de classe en comparaison avec la valeur limite et la valeur cible selon la norme SIA 380/4 (exemple).

Etape de saisie	Valeur du projet	Valeur limite	Valeur cible
1. Local type	Salle de classe: 72 m ²		
2. Puissance installée	16,4 W/m ²	14,0 W/m ²	10,0 W/m ²
3. Eclairage lumineux moyen	750 lux	500 lux	
4. Situation de la lumière du jour	moyenne	moyenne	bonne
5. Régulation de la lumière + heures à pleine charge	manuelle 1500 h/a	manuelle 1700 h/a	semi-automatique 950 h/a
Calcul			
Besoin énergétique spécifique	24,6 kWh/m ²	24 kWh/m ²	10 kWh/m ²
Surface totale	Toutes les salles de classe: 372 m ²		
Besoin énergétique	9200 kWh/a	7800 kWh/a	3700 kWh/a
Economie de dépenses d'énergie		-1400 kWh/a	-5500 kWh/a
Economie de dépenses d'énergie		env. -280 Fr./a	env. -1100 Fr./a

Tableau 31: Bilan énergétique de l'éclairage pour l'ensemble du bâtiment.

Utilisation	Surface (m ²)	Valeur du projet (kWh/a)	Valeur limite (kWh/a)	Valeur cible (kWh/a)
Salle de classe	372	24,6	24	10
Bureau	120	28,4	27	11,5
Couloir	352	15,6	15	3
Autres locaux	(80)	-	-	-
Total	844	21,4	20,7	7,3

Tableau 32: Economie d'énergie en comparaison avec la valeur du projet et les valeurs limite et cible selon la norme SIA 380/4.

Calcul	Valeur du projet	Valeur limite	Valeur cible
Besoin énergétique	18 100 kWh/a	17 500 kWh/a	6 200 kWh/a
Economie d'énergie		- 600 kWh/a	-11 900 kWh/a
Economie de dépenses d'énergie		env. 120 Fr./a	env. 2 400 Fr./a
Economie sur 15 ans		1 800 Fr.	36 000 Fr.

Office cantonal de l'industrie des bâtiments de la ville de Zurich

Depuis le début des certifications Minergie dans les bâtiments utilitaires (2001), les installations d'éclairage sont majoritairement équipées d'éclairages Minergie dans les constructions municipales (Illustration 52). La satisfaction des exigences est contrôlée. L'assurance qualité comprend quatre éléments:

- Formation des concepteurs
- Triple élaboration du justificatif Minergie

(dans la phase de conception, avant l'exécution et en fonctionnement)

- Conseil des concepteurs si besoin
- Contrôles d'exécution en fonctionnement.

Près de 80 bâtiments (écoles, bureaux et hôpitaux) d'une surface utile de 380 000 m² et ayant des besoins énergétiques de 4600 MWh par an pour l'éclairage, ont été jusqu'ici contrôlés de cette manière. Le résultat est que 80 % d'entre eux ont respecté le standard Minergie pour l'éclairage

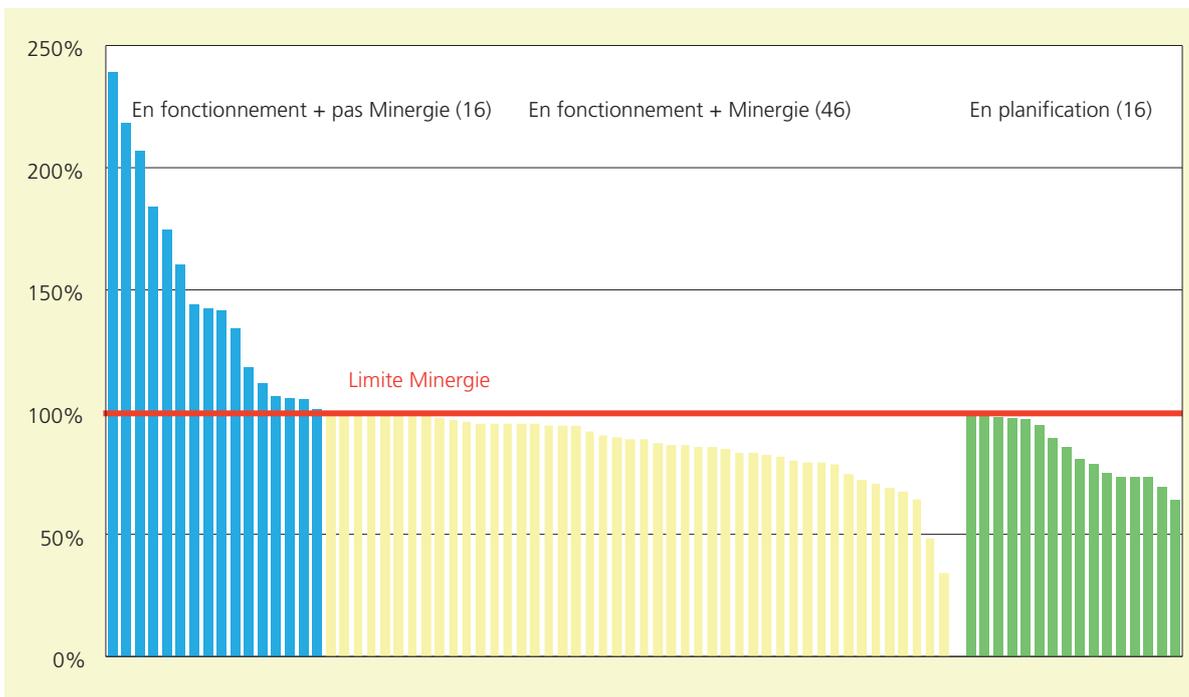


Illustration 52: Contrôle Minergie systématique des éclairages dans les bâtiments propriété de la ville de Zurich.

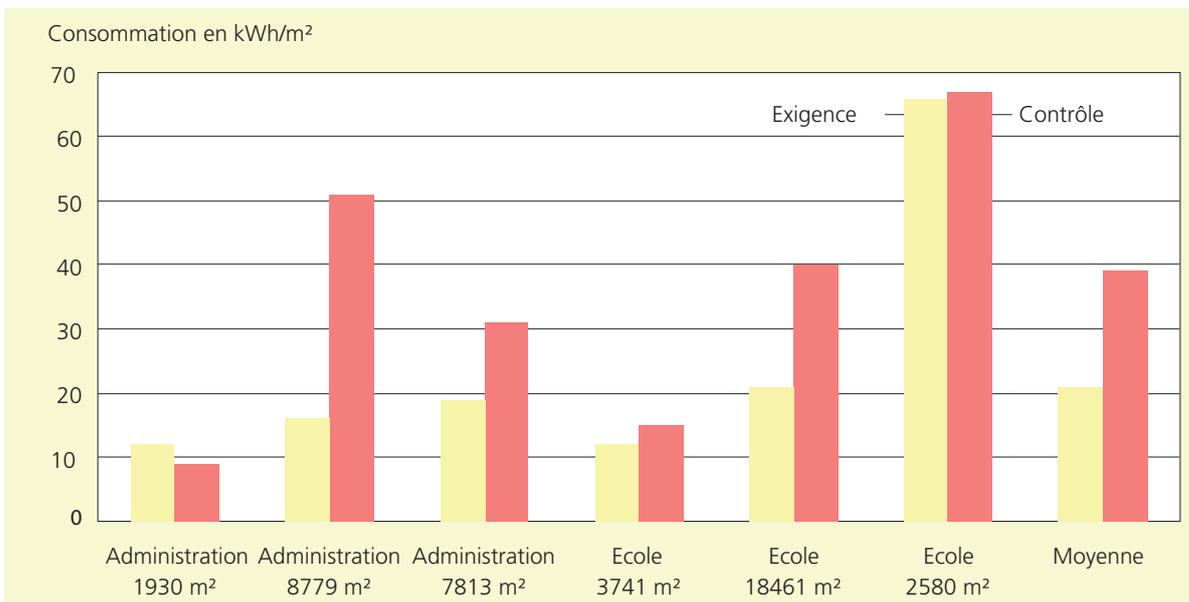


Illustration 53: Contrôles d'exécution sur les bâtiments Minergie à l'extérieur de la ville de Zurich. 50 % ne satisfont pas les exigences.

rage, également en fonctionnement. Quelques bâtiments ont été exclus des spécifications Minergie par exemple pour des raisons de protection du patrimoine historique. Dans quelques rares cas, l'exigence demandée à l'achèvement n'a pas été respectée malgré les spécifications. Le taux de conformité dans la ville de Zurich s'élève à 90 % environ.

L'exigence Minergie n'est pas toujours la même en raison des différentes utilisations dans les bâtiments. Par conséquent, l'indice Minergie a été défini pour comparaison. Il désigne le rapport entre la valeur projet effective et l'exigence Minergie. Si la valeur est de 100 %, la norme Minergie est respectée en tous points. Pour des valeurs supérieures à 100 %, Minergie n'est pas respectée, elle sera donc sous-alignée.

Postes de certification Minergie

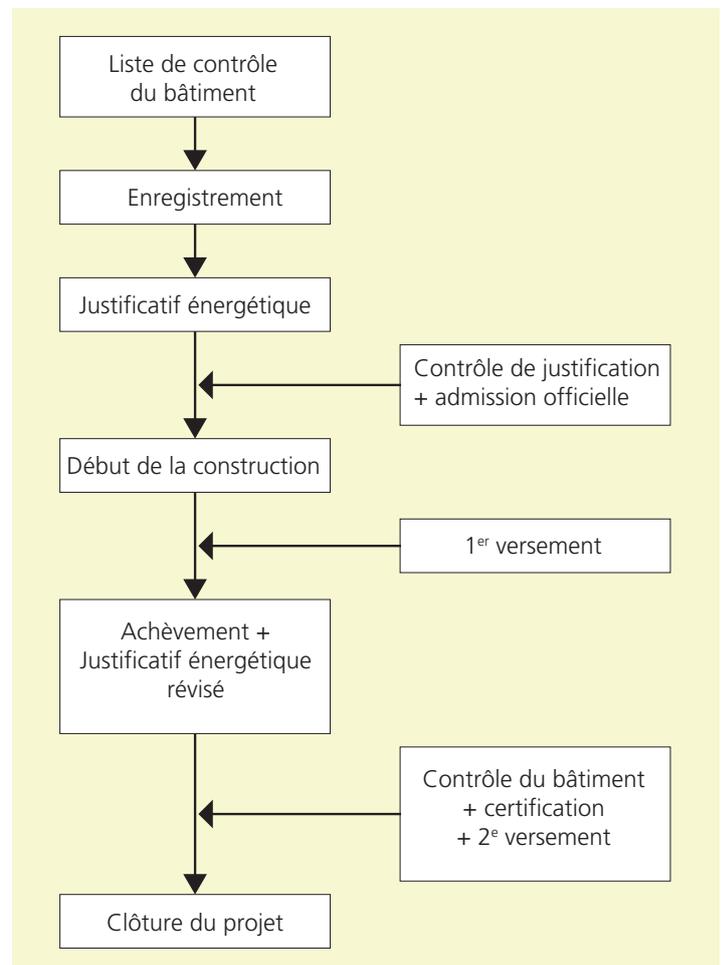
Une étude mandatée par le Secrétariat de Minergie a montré en 2009 que, à l'exception de la ville de Zurich, une bonne moitié de tous les bâtiments qualifiés par Minergie ne méritaient pas du tout le label concernant l'éclairage. La surconsommation était en partie non négligeable. Dans le bâtiment d'une école supérieure et dans une maison d'édition, les besoins en électricité étaient de plus de 100 % supérieurs à l'exigence.

Programme de promotion Prokilowatt

Le programme des « appels d'offres compétitifs » (en abrégé Prokilowatt), financé à partir d'une taxe d'encouragement des services de l'électricité, soutient des projets d'application de l'électricité présentant des économies garanties. En partant de l'expérience des abus concernant le label Minergie, l'Association des industries de l'éclairage (FVB) a présenté un programme devant déterminer les installations d'éclairage qui pourraient réaliser des économies d'énergie garanties. Avec des incitations financières et un procédé analogue à celui de la ville de Zurich, 100 bâtiments utilitaires de 400 000 m² de surface éclairée doivent être équipés en deux ans avec des éclairages efficaces.

Le calcul de l'économie ne devrait pas se faire sur la base de l'exigence Minergie, mais sur une spécification nouvellement définie: les bâtiments doivent se situer 40 % en dessous de la valeur limite de la norme SIA 380/4. Avec cette prescription, on se concentrera sur l'efficacité des luminaires installés et la pertinence des régulations de la lumière devrait être un peu réduite en comparaison avec Minergie. Ce qui semble judicieux, car une bonne installation (matériel) fonctionne souvent de manière plus fiable que des commandes lumineuses complexes (logiciel). Toute la procédure se trouve en ligne sur www.effelux.ch (Illustration 54). Au début de cette procédure se trouve la liste de contrôle du bâtiment qui vérifie les conditions de recevabilité et sert d'accès à l'enregistrement du bâtiment.

*Illustration 54:
Processus pour bénéficiaire des aides financières selon le programme Effelux.*



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 comptent également parmi les 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 ultraviolets 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. L'efficacité des lampes à décharge est de 3 à 10 fois plus grande 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

Critère	Lampe à incandescence	Lampe halogène	Lampe économique	LED
				
Efficacité énergétique	10 – 15 lm/W	15 – 20 lm/W	40 – 60 lm/W	10 – 80 lm/W
Durée de vie	1000 h	2000 h	6000 – 15 000 h	15 000 – 50 000 h
Cycles de commutation	illimité	illimité	3000 – 500 000	20 000 – 1 Mio.
Temps de démarrage	instantané	instantané	20 s – 180 s	instantané
Intensité variable	oui	oui	peu de modèles	nombreux modèles
Rendu des couleurs CRI	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. 2 Fr.	env. 4 Fr.	env. 10 Fr.	env. 50 Fr.
Energie de fonctionnement (1000 lm, 10 000 heures)	750 kWh 150 Fr.	600 kWh 120 Fr.	150 kWh 30 Fr.	150 kWh 30 Fr.
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 %	20 % à 40 %

Tableau 33: Avantages et inconvénients des ampoules pour le remplacement des lampes à incandescence (Retrofit).

avantages du radiateur thermique et ceux des lampes à décharge et présentent peu d'inconvénients en comparaison.

Les lampes à incandescence

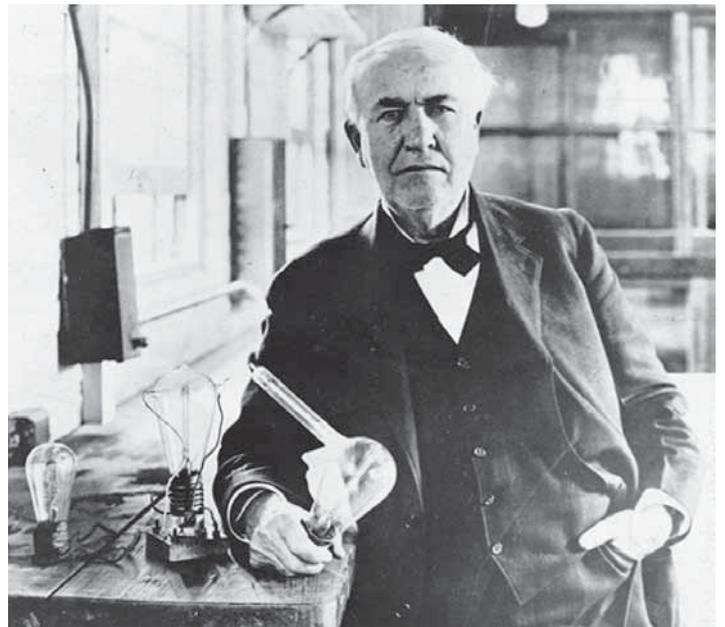
Si une lampe à incandescence doit être remplacée, il existe trois possibilités, toutes disponibles avec les mêmes culots à vis E14 et E27: lampe halogène, lampe économique et lampe LED. Selon l'utilisation, on recommande une autre lampe en remplacement des lampes à incandescence:

■ **Lampe halogène:** pour une lumière d'ambiance avec gradation ou temps de fonctionnement très courts.

■ **Lampe économique:** pour tous les luminaires où l'ampoule est dissimulée et les luminaires avec une très longue durée de combustion.

■ **Lampes LED:** pour les luminaires de lecture, de bureau et des tables à manger, ainsi que l'éclairage au spot en remplacement des spots halogènes.

Illustration 55:
Thomas Alva Edison
dans son labora-
toire de recherche
(env. 1880).



Les critères des trois lampes alternatives sont regroupés dans le tableau 33. La lampe économique représente ici toutes les lampes à décharge, et naturellement, il n'est seulement question que de cette forme de lampe fluorescente en cas de simple remplacement (donc sans achat d'un nouveau luminaire). La technologie LED est expliquée dans le chapitre 4.

Illustration 56:
Plaque signalétique
dans l'hôtel del Co-
ronado à New York,
1888.



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

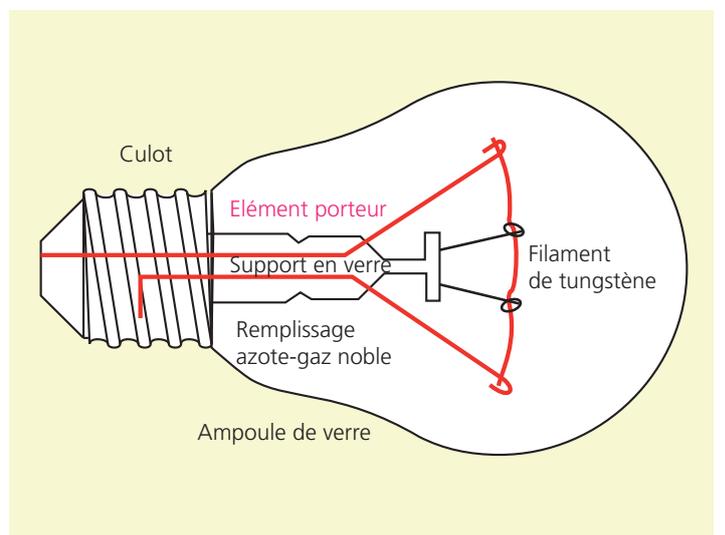


Illustration 57:
Structure d'une
lampe à incandes-
cence.

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 manipulation simple pour l'allumer et l'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 est, avec Osram et Philips, aujourd'hui encore l'une des trois entreprises de lampes qui dominent le monde. Thomas Alva Edison est considéré comme le père de nos actuelles 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 56): «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.

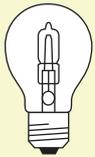
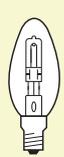
Lampes halogènes

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

Tableau 34: Avantages et inconvénients des radiants thermiques.

Critère	Avantage	Inconvénient
Efficacité énergétique		10 à 15 lm/W
Durée de vie		1000 h
Cycles de commutation	illimité	
Temps de démarrage	instantané	
Gradabilité	toujours	
Rendu des couleurs CRI	100 (optimal)	
Température de surface		> à 200 °C
Facteur de puissance	1,0	
Élimination	déchets ménagers	
Prix d'acquisition	env. 2 Fr.	
Énergie de fonctionnement (1000 lumens, 10 000 h)		750 kWh
Énergie de fabrication	1 kWh	
Plage de puissance	10 à 2000 W	

Tableau 35: Typologie des lampes halogènes (type de culot, plage de puissance, tension).

									
Type de culot	E27	E27	E14	R7s	GU10	G9	GY5.3	GY6.35	G4
Plage de puissance (watts)	18 – 105	28 – 75	18 – 42	48 – 2000	28 – 75	20 – 60	14 – 50	20 – 150	5 – 20
Tension (Volt)	230						12	12, 24	

de très hautes températures de verre et de filament 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 pour les verres isolants. Les lampes halogènes possèdent les mêmes avantages et inconvénients que les lampes à incandescence. En raison de l'interdiction des lampes à incandescence, de nombreux produits ont été complétés avec des lampes halogènes. Les ampoules de verre bien connues comprennent une seconde lampe, la lampe halogène. L'efficacité augmente d'environ 40% ou, en d'autres termes, on économise environ 30% d'électricité avec la même quantité de lumière. Le tableau 35 représente les types de lampes halogènes les plus courants. Il en existe par ailleurs d'autres avec des culots différents. Pour les lampes enfilables (types de culots G, GU, GY), le nombre dans la désignation du type correspond à la distance des broches en millimètres. Pour les lampes avec culot à vis Edison (type de culot E), le nombre désigne le diamètre de la vis en millimètres.

Applications: Les lampes halogènes sont souvent utilisées dans les ménages et l'industrie hôtelière. La lumière brillante convient bien à l'éclairage accentué et à la création d'ambiances lumineuses. Pour les longues durées de fonctionnement (typiquement 4000 heures par an), les coûts d'exploitation sont très vite élevés. Dans un restaurant ou un magasin de 100 m² avec 50 lampes halogènes de 50 watts chacune, la facture d'électricité s'élève à

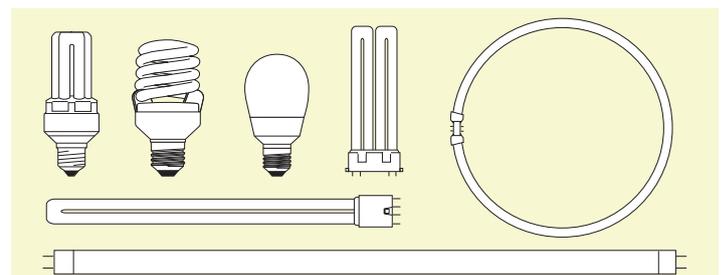
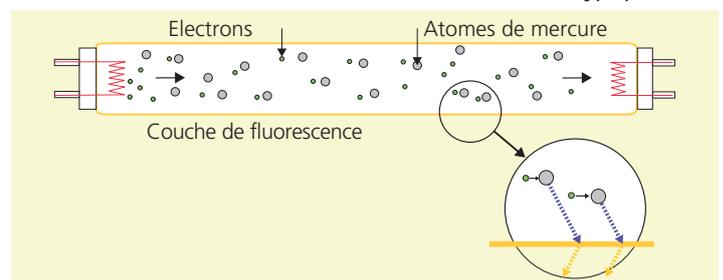
2000 francs environ par an, plus les 1000 francs supplémentaires pour les lampes qui doivent être changées 2 fois dans l'année. Dans bien des cas, une solution avec des spots LED serait amortie en deux ans environ malgré les prix élevés des LED.

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 aujourd'hui à plus de 100 lm/W, sa durée de vie est d'environ 1000 heures. Ce processus d'amélioration des lampes a été possible grâce aux nouvelles substances luminescentes et à la 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/ 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

Illustration 58: Principe de fonctionnement d'une lampe fluorescente.

Illustration 59: Lampes fluorescentes typiques.



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	2G10
	24	1700	27	63	165	2G10
	36	2800	39	72	217	2G10
Lampes économiques	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
		1440	22	65	env. 180	E27

Tableau 36:
Aperçu des principales lampes fluorescentes.

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 lampe luminescente. La désignation «tube de 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 synchronisa-

tion haute fréquence (environ 50 000 décharges par seconde), la lampe fluorescente ne papillote pas (plus) 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 sont 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 100 millions de lampes fluorescentes sont en service, ce qui représente 80 % de toutes les lampes. Seulement 20 % des lampes sont des radiateurs thermiques.

Tableau 37: Avantages et inconvénients des lampes fluorescentes (ballasts électroniques).

Critère	Avantage	Inconvénient
Efficacité énergétique	40 à 100 lm/W	
Durée de vie	6000 h à 30000 h	
Cycles de commutation	Lampes à allumage à chaud: 500000	Lampes à allumage à froid: 5000 à 10000
Temps de démarrage		20 s à 180 s
Gradabilité		Ballast spécial nécessaire
Rendu des couleurs CRI	80 à 90	
Température de surface	30 °C à 50 °C	
Facteur de puissance	supérieur à 25 W: supérieur à 0,9	inférieur à 25 W: 0,5
Élimination		Déchets spéciaux
Prix d'acquisition		à partir de 5 Fr.
Énergie de fonctionnement (1000 lumens, 10000 h)	150 kWh	
Énergie de fabrication	2 kWh à 3 kWh	
Plage de puissance	3 W à 80 W	

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. Il en existe quatre formes différentes (Illustration 59):

- En forme de bâton
- En forme de spirale
- Forme d'ampoule classique
- Spots (non reproduit)

Il existe d'importantes différences de qualité entre les lampes économiques, ce que de nombreux tests confirment.

Pour généraliser, les lampes économiques en forme de bâton sont de toute évidence les meilleures. Pour les autres formes, un temps de démarrage plutôt long et une capacité de commutation plutôt faible pèsent négativement dans la balance. Si on se décide pour une lampe économique, on devrait si possible se porter vers une lampe en forme de bâton avec une capacité de commutation élevée, c'est-à-dire supérieure à 75 000 activations et désactivations pendant sa durée de vie. Depuis septembre 2010, les données concernant les cycles de commutation doivent figurer sur tous les emballages de lampes. Les meilleures lampes économiques sont mentionnées sur la page Internet topten.ch.

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 appe-

lée lampe en pot de confiture en raison de sa forme et de sa taille.

Si l'on juge d'après la qualité des lampes économiques actuelles qui peuvent faire jeu égal avec les lampes à incandescence en ce qui concerne la qualité lumineuse et la taille, l'inventeur est Jürg Nigg. En 1984, il a fabriqué et breveté la première lampe économique de qualité dans sa société Acrotronic située dans le 5e arrondissement de Zurich. Un démarrage immédiat, l'absence de papillotement et de scintillement, une très longue durée de vie ainsi qu'une masse compacte et peu de poids caractérisent la lampe économique de Nigg. Avec cette lampe, les adaptateurs (culot avec électronique intégrée) et les bâtons lumineux peuvent aussi être séparés, ce qui permet d'exploiter différentes intensités lumineuses avec le même adaptateur. L'argument écologique lié à son utilisation est aussi basé sur la durée de vie de l'adaptateur, 5 fois plus.

L'industrie a copié la lampe économique de Nigg, mais a renoncé à la séparation du bâton lumineux et de l'adaptateur pour des raisons économiques. La lampe de Nigg est encore disponible aujourd'hui et mise toujours sur la qualité, ce que confirment de nombreux tests de magazines de consommateurs. La plus grande partie des lampes économiques sont cependant commercialisées par les grands groupes Osram et Philips.

Illustration 60: Panneau de mesure pour le test continu de lampes économiques.

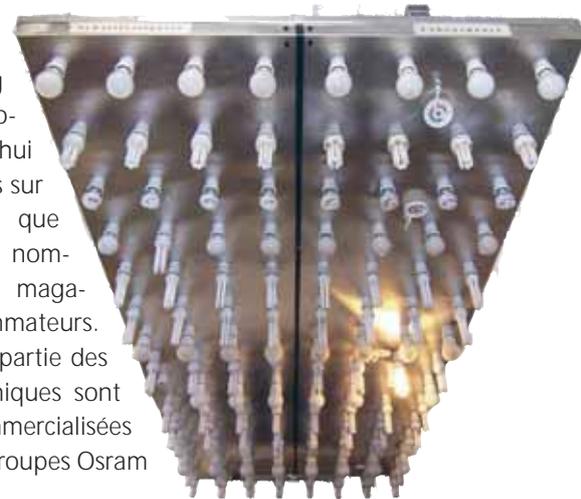


Illustration 61: Jürg Nigg et son invention, l'adaptateur pour lampes économiques (www.arcotronic.ch).

Gradation des lampes fluorescentes

Les ballasts électroniques graduables sont plus chers que les non-graduables et nécessitent des dispositifs de commande et des liaisons de commande supplémentaires. Contrairement aux lampes à incandescence (qui deviennent très rougeâtres lors de la gradation), la température de couleur ne change pas avec la gradation des lampes fluorescentes. Pour cette raison, aucune lumière d'ambiance ne peut être produite par la gradation des lampes fluorescentes (Illustration 62).

La gradation des tubes fluorescents est sujette à pertes. L'efficacité diminue fortement, surtout avec un niveau de gradation

faible. La règle d'or qui prévaut est qu'une lampe fluorescente graduée sur 25 % de flux lumineux absorbe encore 50 % de la puissance de fonctionnement totale. C'est évidemment moins que pour les lampes à incandescence. Cependant, pour des raisons d'efficacité énergétique, il est peu recommandé d'utiliser des lampes fluorescentes dans la zone de charge située au-dessous de 50 % de leur flux lumineux nominal. Dans les couloirs de bâtiments de bureaux et les écoles, les lampes fluorescentes sont souvent utilisées comme éclairage lèche-mur. Si l'agencement d'un couloir, par exemple, est réalisé avec une densité importante de tubes incandescents, les

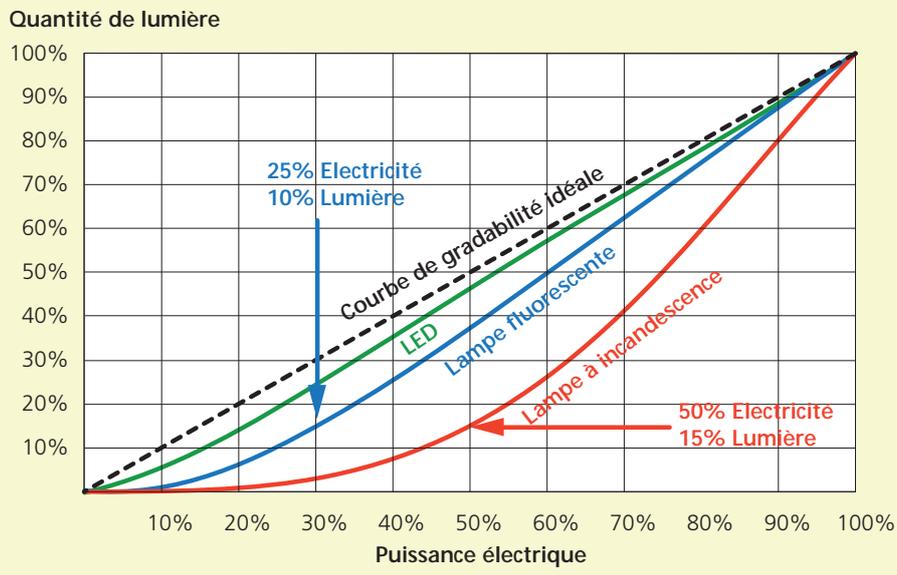


Illustration 62:
Comportement de gradabilité des trois types de lampe.

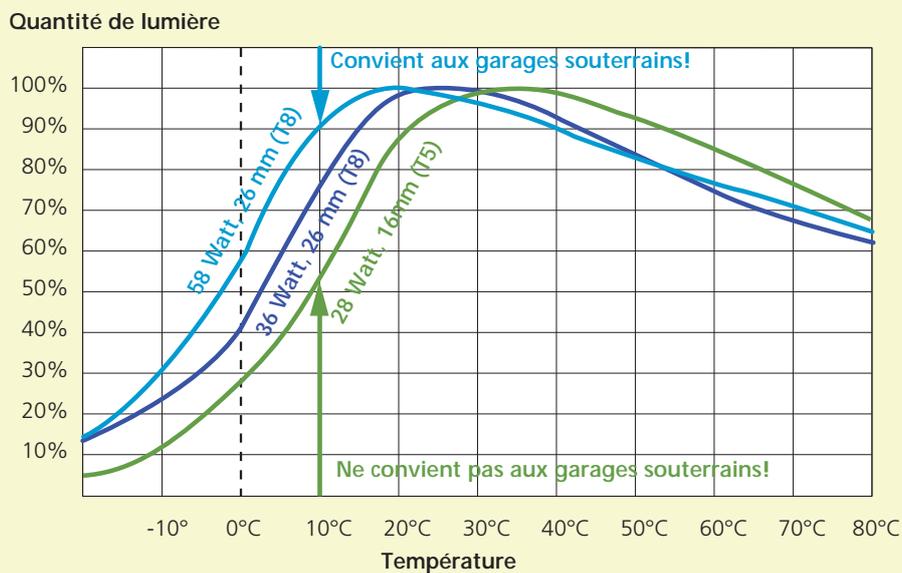


Illustration 63:
Quantité de lumière dépendante de la température dans les lampes fluorescentes.

lampes sont graduées de manière constante à un niveau relativement bas en raison d'une présence trop importante de lumière. Dans un tel cas, l'efficacité des tubes diminue significativement.

Influence de la température sur les lampes fluorescentes: Le comportement des lampes fluorescentes dépend fortement de la température ambiante car la pression de la vapeur de mercure dans la lampe dépend justement de la température. A basse température, la pression de la vapeur est trop faible, c'est-à-dire qu'il n'y a pas assez d'atomes ionisés. Selon le type de lampe, il faut que la température du verre soit comprise entre 20 et 40 °C pour que la lampe atteigne son efficacité lumineuse maximum. A une température ambiante de 18 °C, une lampe fluorescente a un flux lumineux plus faible à l'allumage qu'après plusieurs minutes de fonctionnement, lorsque la lampe a chauffé. Les interrupteurs à minuterie, générant un allumage de courte durée, ne permettent pas à la lampe d'atteindre la totalité de son flux lumineux, ce qui peut être problématique (Illustration 63). Avec des températures ambiantes basses ou en cas de surchauffe, en raison d'une accumulation thermique dans des luminaires fermés, la lampe n'atteint pas son flux lumineux nominal. Selon le type de lampe, les caractéristiques thermiques sont différentes. Par conséquent, lors de la conception de luminaires, il faut tenir compte des propriétés de la lampe.

3.4 Lampes à décharge

La lampe à décharge à haute pression est souvent utilisée aujourd'hui dans l'éclairage des magasins et des halles. La lampe est caractérisée par une forme compacte, une bonne orientabilité et un bon rendu des couleurs. La source lumineuse, en forme de points, produit une lumière très brillante, et est aussi utilisée dans le secteur automobile. 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 dé-

charge 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 de décharge) et donc un arc intense. Mieux vaut éviter de la regarder directement 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 (sphère intégrante). 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



Illustration 64:
Lampe à halogénure métallique 35 watts, 3300 lumens (longueur: env. 10 cm).

Tableau 38:
Avantages et inconvénients de lampes à halogénure métallique.

Critère	Avantage	Inconvénient
Efficacité énergétique	80 – 100 lm/W	
Durée de vie	5000 h – 10 000 h	
Cycles de commutation	limité	
Temps de démarrage		Plusieurs minutes
Gradabilité		non
Rendu des couleurs CRI	Lampes Delux CRI = 90 (très bon)	Lampes standard CRI = 80 (bon)
Température de surface		> 300 °C
Facteur de puissance	supérieur à 0,9	
Elimination		Déchets spéciaux (mercure)
Prix d'acquisition		50 Fr. à 500 Fr.
Energie de fonctionnement (1000 lumens, 10 000 h)	150 kWh	
Energie de fabrication	2 kWh à 3 kWh	
Plage de puissance	3 W à 100 W	

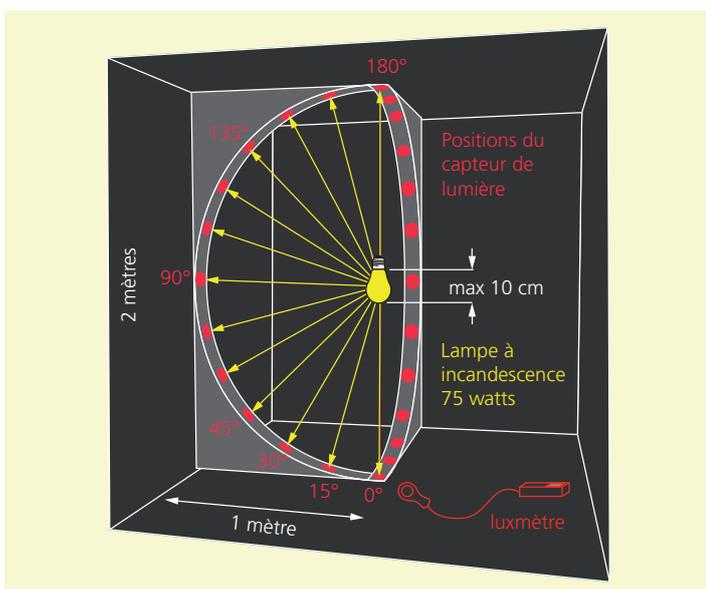
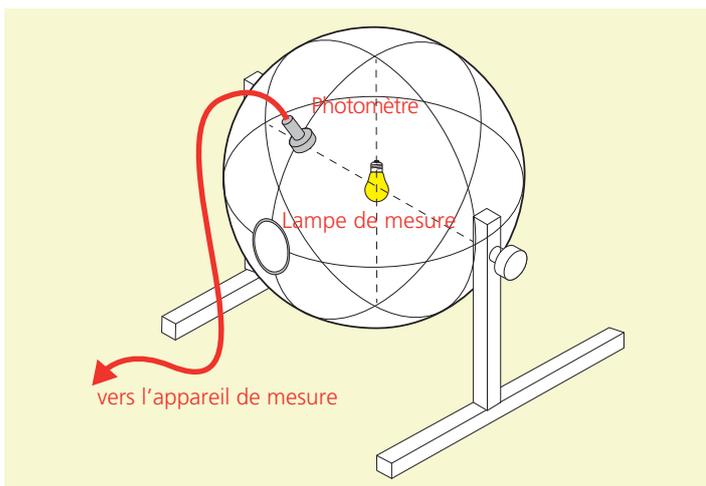
de la sphère, il y a une petite ouverture dans laquelle est installée une vitre en verre dépoli. La luminance sur cet élément vitré est proportionnelle au flux lumineux total. La luminance se mesure avec un capteur de lumière. Pour pouvoir mesurer uniquement le flux lumineux total provenant d'une source 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.

Illustration 65:
Sphère d'Ulbricht.

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

Illustration 66:
Structure simple
d'un goniomètre
pour la mesure
d'une lampe.



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 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.

Le 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 66 qui correspond à un mini-goniomètre peut être utilisé.

Dispositif

- Un local sombre, non réfléchissant (au moins 2 m x 2 m x 2 m).
- Un demi-cercle (ou 2, l'un pour la mesure longitudinale et l'autre pour la mesure transversale, voir illustration) 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

- Mesure des éclairements lumineux à chacun des points de mesure établis, 13 sur l'illustration avec un espacement angulaire de 15°.
- Orientation de la source lumineuse ou du goniomètre de 90° par rapport à l'axe vertical et mesure des éclairements lumi-

neux 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°.

5. Pour chaque angle intermédiaire: calcul de la part de la surface éclairée de la sphère.

$2\pi \cdot [\cos(\alpha/180 \cdot \pi) - \cos(\alpha/2/180 \cdot \pi)]$. $\pi = 3,1416$, par exemple pour 7,5°:

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. Eclairement lumineux · surface, par exemple 7,5°: $28 \text{ lx} \cdot 0,21 \text{ m}^2 = 6 \text{ Lumen (lm)}$. La somme de tous les flux lumineux donne le flux lumineux total de la source lumineuse.

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

Tableau 39:
Calcul du flux lumineux total d'une lampe à incandescence 75 W à partir de 26 valeurs lux mesurées.

3.6 Lampes économiques: erreurs courantes

Beaucoup d'idées foncièrement fausses circulent sur les lampes économiques. En voici une sélection:

■ **Affirmation 1:** L'allumage d'une lampe fluorescente consomme plus d'énergie que son fonctionnement pendant une heure.

Ce qui est vrai: Aucune surconsommation en énergie n'est due à l'allumage! Le fait d'éteindre la lampe apporte toujours une réduction de la consommation électrique. Si c'était le cas, pendant le temps d'amorçage d'à peine une seconde, la consommation électrique d'une lampe de 36 watts développerait une puissance de 130 000 W. Ce qu'aucun fusible ne pourrait supporter.

■ **Affirmation 2:** Une commutation fréquente des lampes économiques réduit leur durée de vie.

Ce qui est vrai: La réduction de la durée de vie en raison de la commutation dépend de la qualité de la lampe. Pour les lampes économiques à longue durée de vie (à partir de 12 000 heures de fonctionnement déclarées), une réduction dans la pratique est insignifiante. Ces lampes peuvent être allumées et éteintes plus de cent fois par jour pendant 12 ans.

■ **Affirmation 3:** Les lampes fluorescentes papillotent.

Ce qui est vrai: Les ballasts électroniques permettent aux luminaires modernes de fonctionner à une fréquence de 40 000 Hertz. L'œil humain ne perçoit pas les fréquences supérieures à 100 Hertz. Les vieilles lampes fluorescentes avec des ballasts conventionnels papillotent en revanche à 50 Hertz, ce qui est effectivement désagréable pour les personnes.

■ **Affirmation 4:** La lumière des lampes fluorescentes est froide et mate.

Ce qui est vrai: Les températures de couleur et les spectres de lumières peuvent être choisis lors de l'achat d'une lampe fluorescente. Les lampes 3 bandes dans les couleurs «blanc chaud» (désignation 830) ou «blanc extra chaud» (827) produisent une

lumière dont le rendu des couleurs correspond à celui d'une lampe à incandescence.

■ **Affirmation 5:** L'intensité des lampes fluorescentes ne peut pas être réglée.

Ce qui est vrai: Le réglage de la luminosité est possible pour les lampes fluorescentes. Pour cela, des ballasts électroniques graduables sont toutefois nécessaires. Par ailleurs, un câble supplémentaire est également requis. Pour les lampes économiques à vis, il existe quelques rares modèles pouvant être réglés par le biais de gradateurs de lampe à incandescence classiques.

■ **Affirmation 6:** Les lampes fluorescentes sont coûteuses.

Ce qui est vrai: Les lampes à incandescence ne sont moins chères qu'à l'achat, c'est le contraire à l'utilisation. En comparaison globale, la lampe fluorescente est nettement meilleur marché. Le remplacement d'une lampe à incandescence de 100 W par une lampe économique au flux lumineux identique permet une économie de Fr. 100, calculée sur la durée de vie de la lampe.

■ **Affirmation 7:** Les lampes halogènes basse tension sont des lampes économiques.

Ce qui est vrai: L'erreur provient d'une mauvaise compréhension des termes. Ce n'est pas la consommation d'énergie de la lampe qui est basse, mais sa tension, d'où son nom «lampe halogène basse tension». Cette faible tension nécessite des courants élevés dans des fils relativement épais. L'efficacité lumineuse d'une lampe halogène de 50 W est 50 % meilleure que celle d'une lampe à incandescence mais trois fois moins bonne que celle d'une lampe fluorescente compacte.

■ **Affirmation 8:** La fabrication consomme beaucoup d'énergie.

Ce qui est vrai: La fabrication d'une lampe économique consomme près de quatre fois plus d'énergie que la fabrication d'une lampe à incandescence. La longévité de la lampe économique étant environ dix fois plus élevée que celle de la lampe à incandescence, le bilan énergétique global va toutefois nettement en faveur de la lampe économique.



LED: diodes électroluminescentes

4.1 Propriétés et comportement de fonctionnement

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 50 lumens/watt. Les meilleures lampes LED atteignent jusqu'à 100 lm/W. Leur développement n'est pas encore terminé, car d'ici à 10 ans l'intensité lumineuse sera doublée ou triplée avec des LED blanches.

La technologie des LED va révolutionner l'éclairage dans les 10 prochaines années, 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 grosso modo encore doubler pour parvenir à environ 150 lumens par watt.

- La zone de puissance va être étendue, de sorte que toutes les tâches d'éclairage pourront être solutionnées avec des LED.

- Les prix vont chuter, mais les proportions et la rapidité de cette baisse dépendront de facteurs économiques et politiques ainsi que de la disponibilité des matières premières. Actuellement, 97 % des «terres rares» nécessaires pour fabriquer des LED proviennent de Chine.

En plus de la technologie classique des LED, des travaux de recherche concernant la DELO (Diode électroluminescente organique) sont en cours. Les DELO présentent des avantages mais également des inconvénients face aux LED cristallines:

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

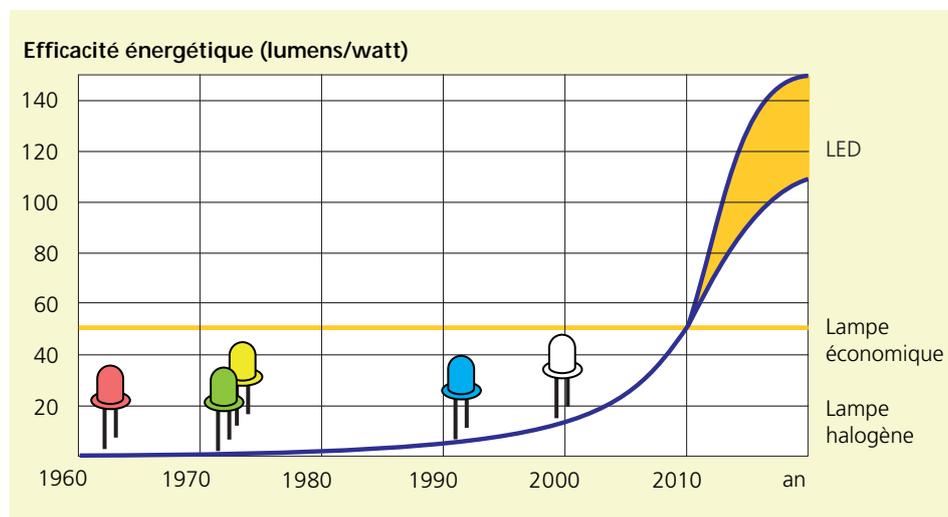


Illustration 67: Evolution de l'efficacité énergétique des diodes lumineuses.

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

Certains prévoient qu'il sera possible à l'avenir d'acheter une lumière DELO quasiment 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 DELO actuelles mesurent au maximum 10 cm sur 10 cm et ont une efficacité lumineuse qui, avec 20 l/W, se situe autour de celle des lampes halogènes.

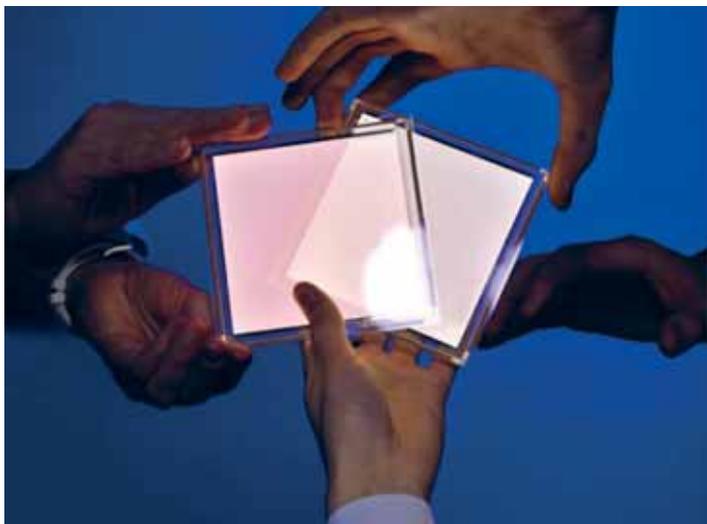
Métaux des terres rares

Les métaux des 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 des 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 3e groupe du tableau périodique suivants font partie des métaux des 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).

La quantité extraite dans le monde était de 124 000 tonnes en 2008. La Chine en a produit près de 119 000 tonnes en 2006 et domine totalement le marché (2007: 95 % du marché mondial, 2010: 97 %). La Chine a limité la quantité de ses exportations en terres rares. Pour quelques métaux, une interdiction totale d'exportation devrait être appliquée (yttrium, thulium et terbium) et pour le néodyme, le lanthane, le cérium et l'europium, un quota d'exportation de 35 000 tonnes devrait être fixé. Avec cette politique, la Chine souhaite obtenir l'exécution de la production de technologies clé sur le sol chinois. L'exploitation des réserves de 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, en particulier en Chine.

Illustration 68:
Tendance à long terme pour les LED organiques (OLED).



Pays	Extraction 2006 (t)	Extraction 2007 (t)	Extraction 2008 (t)	Extraction 2009 (t)	Réserves connues (t)
Chine	119 000	120 000	120 000	120 000	36 000 000
Inde	2 700	2 700	2 700	2 700	3 100 000
Brésil	730	730	650 t	650	48 000
Malaisie	200	200	380 t	380	30 000
Etats CEI	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	19 000 000
USA	0	0	0 t	0	13 000 000
Australie	0	0	0 t	0	5 400 000
Autres	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	22 000 000
Total	123 000	124 000	124 000	124 000	98 600 000

Tableau 40:
Extraction et réserves des métaux précieux des terres rares.

4.2 Avantages des LED

Les diodes lumineuses possèdent de nombreux avantages en comparaison des ampoules classiques, ce qui les rend intéressantes, malgré leur prix élevé, pour des applications définies.

■ **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, car les marchandises et les pièces d'exposition éclairées sont protégées contre le vieillissement.

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

■ **Lumière brillante:** Les lampes LED diffusent une lumière brillante, en forme de points, et peuvent donc être utilisées en remplacement idéal de n'importe quelle lampe halogène.

■ **Efficacité élevée:** D'ores et déjà, les lampes LED sont aussi efficaces que les lampes économiques. Dans les prochaines années, cette efficacité devrait au minimum doubler.

■ **Longue durée de vie:** Grâce à une durée de fonctionnement moyenne de 1000 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 lampes économiques, 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 application iPhone).

Gradation des LED

Contrairement aux lampes à incandescence et aux lampes fluorescentes, les LED sont graduables sans perte et gagnent même en efficacité énergétique. Il existe deux procédés de gradation connus (Illustration 69).

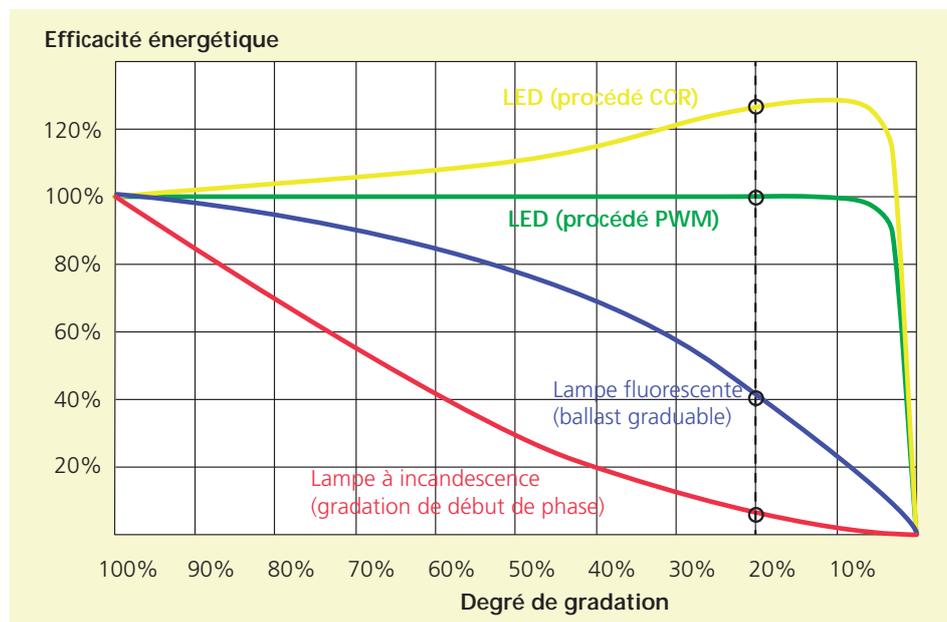


Illustration 69: Efficacité énergétique en relation avec le degré de gradabilité des lampes LED en comparaison avec les lampes fluorescentes et les lampes à incandescence.

Procédé PWM

Avec la modulation de largeur d'impulsions, l'électricité est synchronisée avec des commutations très rapides, donc mises sous tension et hors tension successives. Les commutations sont effectuées plusieurs dizaines de milliers de fois par seconde, de sorte qu'aucun scintillement n'est perceptible. De cette façon, les LED peuvent être graduées pratiquement sans perte jusqu'à un faible pourcentage de leur pleine puissance. L'autoconsommation de l'électronique doit aussi être prise en compte. En cas de faible niveau de gradation, elle pèse plus dans la balance, la gradation n'est donc pas tout à fait sans perte. Avec la gradation PWM, la propriété de rendu des couleurs de la LED reste presque inchangée.

Illustration 70: Section du «Panos Infinity» de Zumtobel avec la technique Cree-True-White.

Illustration 71: Lumière LED chaude, blanche neutre et blanche froide provenant du même luminaire (Technique PAL, Regent).

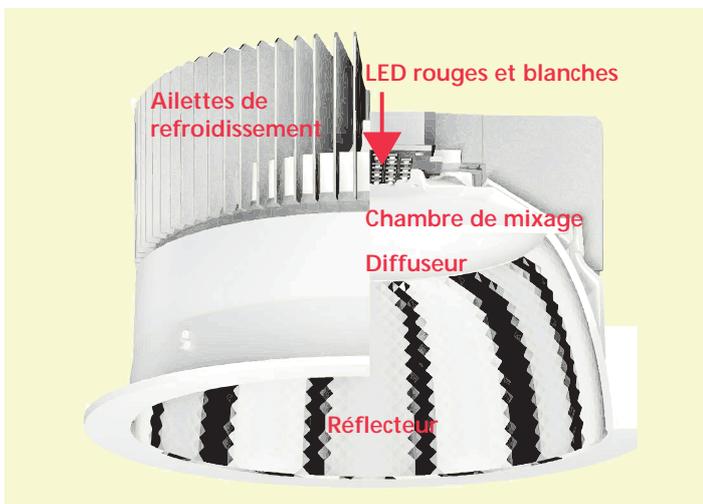
Procédé CCR

CCR est l'acronyme de «Constant Current Reduction» («Réduction du courant constant») et utilise l'avantage d'une meilleure efficacité de la LED en pleine

charge lors de la réduction du courant électrique. Du point de vue de l'efficacité énergétique, ce procédé doit être préféré au procédé PWM. Toutefois les propriétés de rendu des couleurs changent plus fortement avec la gradation CCR de la LED qu'avec le procédé PWM. Ce procédé de gradation est plus efficace, mais n'est que peu utilisé, puisque sur le marché il n'existe pas encore de dispositif de fonctionnement pour la gradation CCR.

Efficacité lors de la gradation (exemple):

Si la quantité totale de lumière est réglée à 20%, les lampes LED diffusent 25% de la lumière avec la gradation CCR (125% de 20%) et 20% avec une gradation PWM. En revanche, pour les lampes fluorescentes, ce ne sont que 8% (40% de 20%) et pour les lampes incandescentes moins de 2%. Cela signifie concrètement qu'une lampe à incandescence ayant une efficacité de 12 lumens par watt avec une gradation de 20% ne présente plus qu'une efficacité égale à 1 lumen par watt.



Modulation des couleurs pour les LED

Une autre 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 haut 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 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 71).

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 lu-

mière 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 77 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 70).

4.3 Défis

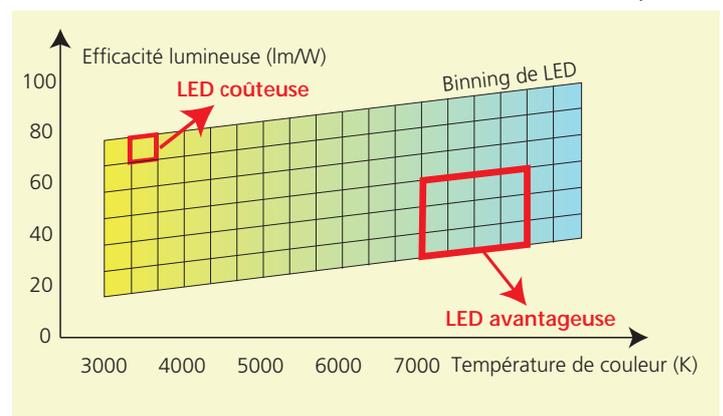
Efficacité énergétique

En ce qui concerne l'efficacité lumineuse (efficacité énergétique) des diodes lumineuses, il existe de grandes différences qui sont dues à la qualité de la lumière mais également à la stratégie de prix de nombreux fournisseurs. Le prix est certes un facteur important, mais on ne peut pas supposer de manière générale que les LED coûteuses sont meilleures. Les modules de base de la LED, les cristaux semi-conducteurs éclairés, sont proposés sur le marché dans différentes qualités. Pour le classement, on utilise les systèmes Binning (classification des LED). Chaque LED est affectée à un code BIN qui présente différentes qualités, comme par exemple la température de couleur, l'efficacité énergétique et des tolérances.

■ Exemple pour une LED coûteuse: une puce LED à efficacité lumineuse élevée, avec une température de couleur blanc chaud, un indice de rendu des couleurs élevé et de faibles tolérances de ces valeurs dans le même BIN.

■ Exemple pour une LED bon marché: une puce LED à efficacité lumineuse faible à

*Illustration 72:
Le «Bin» détermine
l'efficacité, les tolé-
rances et les prix.*



moyenne, avec une température de couleur blanc froid, un indice de rendu des couleurs faible et de hautes tolérances de ces valeurs dans le même BIN.

La grande diversité des codes BIN constitue un problème central sur le marché des LED. En effet, les fabricants utilisent d'autres systèmes de Binning. Une standardisation et une limitation du BIN à un nombre clair de modèles n'existe toujours pas. Pour les fabricants de composants LED de qualité supérieure, il est difficile d'acheter des bons BIN sur le marché. Pour le marché de masse, les LED peuvent en revanche être achetées en grandes quantités et à des prix avantageux: ce capharnaüm de LED de toutes les températures de couleur et de toutes les quantités lumineuses possibles nuit aux lampes qui sont alors vendues bon marché et donnent une mauvaise image de la jeune technologie LED (Illustration 72).

Durée de vie

La longévité est l'avantage le plus mentionné pour la LED, ce qui la rend compétitive actuellement. 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 50 000 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

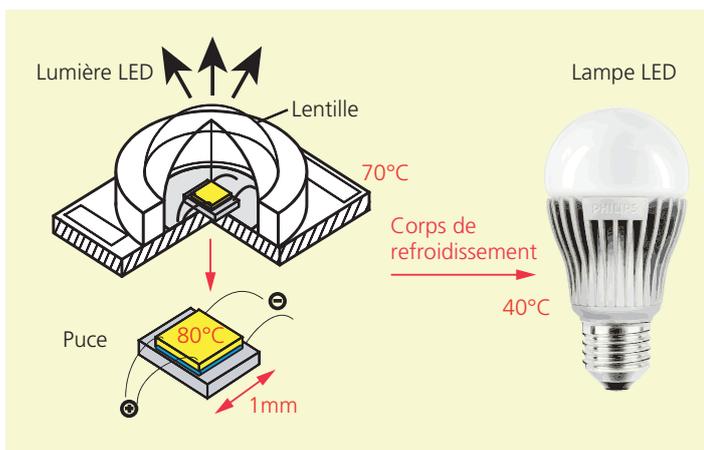
vont de pair pour la LED: si la température de la puce dépasse une certaine limite (p.ex. 80 °C suivant le modèle), la durée de vie diminue fortement. Le recul de la durée de vie signifie pour les diodes lumineuses une diminution continue de la diffusion de lumière. En règle générale, une durée de vie de 50 000 heures signifie une baisse de la quantité de lumière de 30%. Pour les LED surchauffées, la quantité de lumière baisse très rapidement ou entraîne la destruction totale de la lampe. 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 73).

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 chro-

*Illustration 73:
La gestion thermique et la qualité de l'appareil déterminent la durée de vie.*



matique 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 visible

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 les spectres visibles des illustrations 74 et 78, 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 visible 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 74).

■ La lumière de la lampe à incandescence est quasi le contraire de la lumière du jour: elle possède certes un spectre visible complet, mais la part de rouge domine (Ill. 75).

■ La lumière émise par les lampes économiques (et toutes les autres lampes à décharge) possède un spectre visible 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 76).

■ 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 77 et 78).

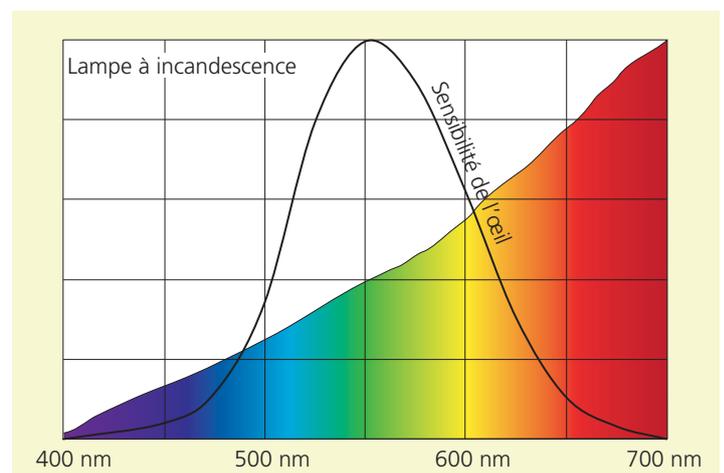
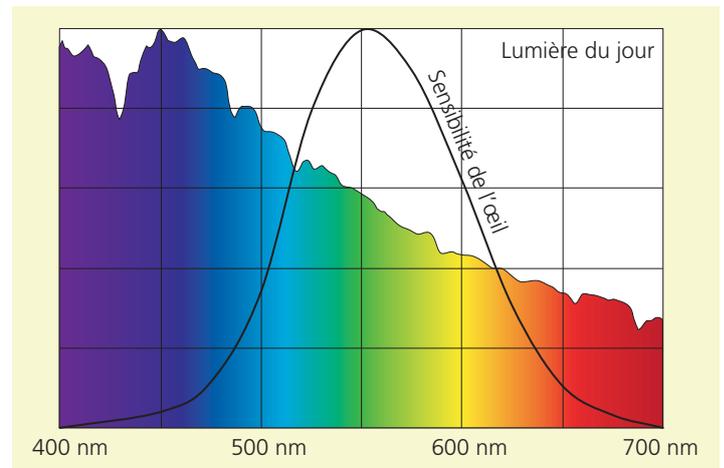
Température de couleur

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.

Illustration 74:
Spectre visible de la lumière du jour.

Illustration 75:
Spectre visible d'une lampe à incandescence.



■ A la surface du soleil, la température est d'environ 6500 kelvins. C'est ce qu'on appelle la température de couleur ou le blanc couleur 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 des couleurs 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.

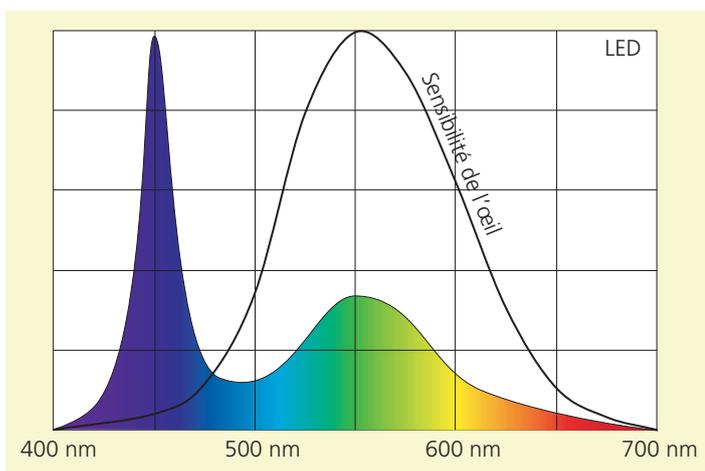
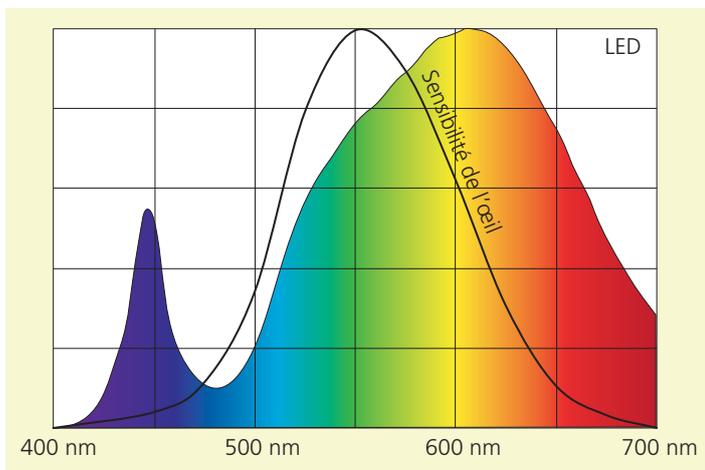
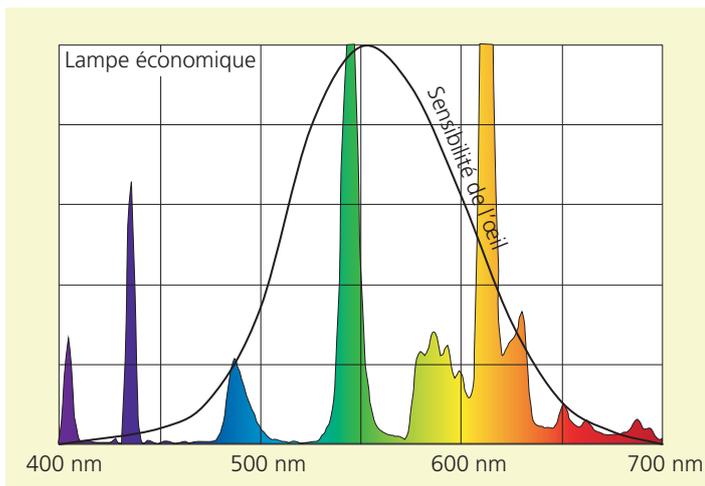


Illustration 76:
Spectre visible
d'une lampe économique usuelle.

Illustration 77:
Spectre visible
d'une bonne lampe
LED (CRI = 90).

Illustration 78:
Spectre visible
d'une mauvaise
lampe LED (CRI
bas).

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 entre la perception humaine des couleurs (couleurs) et les causes physiques du stimulus de couleurs (composante chromatique).

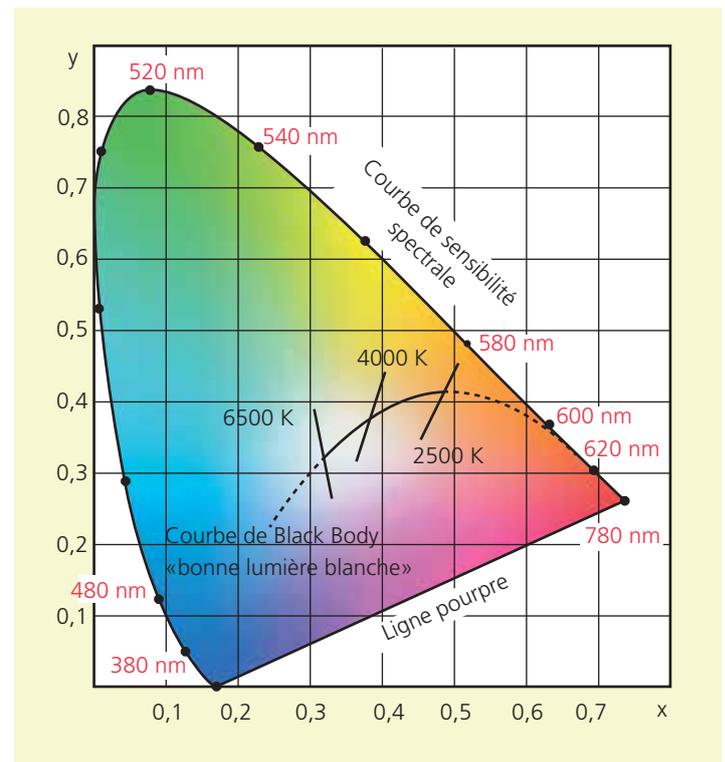
Il s'agit en réalité d'un espace en trois dimensions tel que défini par Rösch en 1928. Sur la surface, on ne peut représenter que deux dimensions (Illustration 79). Tous les stimulus de couleur réalisables techniquement, que ce soient les couleurs de lumière ou les couleurs d'objets, se situent à l'intérieur 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).

Illustration 79:
Triangle des couleurs (forme de semelle) visibles par l'œil humain.

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 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

à 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



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		

Illustration 80:
Tests de l'indice de rendu des couleurs (selon DIN 6169).

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 en anglais 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.

4.4 Produits et applications

Actuellement, la LED peut être désignée comme premier choix pour certaines applications.

■ **Liseuses:** Tandis qu'une lampe halogène en fonctionnement devient très chaude, les luminaires LED restent tièdes. Pour les liseuses, la forme compacte de la LED est par ailleurs un grand plus, même en comparaison avec d'autres luminaires à lampes économiques.

■ **Luminaires suspendus:** La lumière brillante convient mieux que n'importe quel luminaire halogène suspendu au-dessus d'une table à manger et économise 80 à 90 % d'électricité. La plupart des magasins spécialisés et la grande distribution proposent déjà de bons luminaires LED pour table à manger.

■ **Downlights:** Les luminaires encastrés dans le plafond des immeubles d'habitation ou commerciaux sont une solution LED attractive: 50 % d'économies d'énergie par rapport aux lampes économiques, voire 80 % par rapport aux lampes halogènes avec une durée d'amortissement de seulement un à deux ans.

■ **Spots:** Dans les magasins, ils remplacent les lampes aux halogénures métalliques. Un faisceau lumineux sans émission de chaleur et des frais d'entretien faibles parlent en faveur du spot comme alternative.



Illustration 81:
Produits LED
typiques.

■ **Luminaires linéaires:** Pour les couloirs des bâtiments d'architecture de grande qualité, c'est la solution de remplacement optimale pour les rails lumineux avec tubes fluorescents. Ce qui permet d'économiser environ 50 % d'énergie en comparaison avec des lampes fluorescentes.

■ **Lampadaires de rues:** Grâce à la lumière LED dirigée, on peut non seulement réaliser des économies d'énergie mais également éliminer l'éblouissement désagréable sur les façades des immeubles d'habitation bordant les rues.

■ **Lampes Retrofit:** Les lampes LED «à incandescence» et les spots LED «halogènes» sont disponibles en remplacement des luminaires classiques. Ces derniers sont certes très bien et nettement meilleurs que les lampes économiques, mais leur prix est moins attractif que celui des luminaires avec LED fixes.

■ **Applications recommandées avec conditions:** Eclairage dans les bureaux et les salles de classe, luminaires sur pied, spots pour halles et salles de sport.

4.5 Lampes LED à l'épreuve

A vrai dire, la technologie LED est prédestinée à une combinaison intégrale lampes-luminaires. En raison de leur longue durée de vie et de la nécessité d'un refroidissement suffisant, cela tombe sous le sens d'intégrer les modules LED directement dans le corps du luminaire et de renoncer à un mécanisme de remplacement avec les culots répandus (E27, GU10, autres). Mais, comme c'est souvent le cas lors d'un tournant technologique fondamental, de nouveaux produits arrivent d'abord sous forme connue sur le marché: les premières voitures ressemblaient à des carrosses, les premiers ordinateurs à des machines à écrire et les premières lampes LED à des lampes à incandescence.

Un test mandaté par l'émission des consommateurs «Kassensturz» de la Télévision suisse alémanique a montré qu'il existe de bons produits qui fournissent suffisamment de lumière pour le remplacement d'une lampe à incandescence de 60 watts et qui offrent ainsi une réelle alternative aux lampes économiques peu

appréciées. En octobre 2010, 14 lampes LED commercialisables avec des culots E27 et E14 ont été mesurées dans le laboratoire fédéral METAS à Berne et leur déclaration d'exhaustivité et de conformité a été contrôlée. Les critères étaient:

- Quantité de lumière, puissance électrique et intensité lumineuse
- Température de couleur, espace chromatique et indice de rendu des couleurs
- Facteur de puissance
- Distribution spectrale (en comparaison à une lampe à incandescence).

En janvier 2011, les résultats ont été diffusés dans l'émission «Kassensturz» de la Télévision suisse alémanique (Résultats des mesures, Illustration 85 et Tableau 44).

Commentaire sur les résultats de mesure

■ Les puissances mesurées de 12 lampes LED Retrofit divergent entre -19 % et +12 % des puissances nominales déclarées. Ces différences sont relativement grandes. La variance pour des lampes du même type de construction aurait dû être tout aussi importante. Le phénomène de grande divergence de puissance avec la valeur nominale apparaît dans les mêmes proportions pour les lampes économiques également, tandis que pour les radiateurs thermiques (lampes à incandescence et halogènes) les puissances coïncident généralement bien avec les valeurs standard déclarées.

■ Les **flux lumineux** s'écartent également fortement de la déclaration, en particulier pour la lampe LED de Paulmann qui diffuse 34 % moins de lumière que ce qui est documenté. De même pour la lampe d'Evenlight qui diffuse nettement moins de lumière que ce qui est indiqué. Les deux lampes sont de fabrication inconnue.

■ L'**efficacité lumineuse** est le rapport entre le flux lumineux et la puissance absorbée. La meilleure valeur de 94 lumens par watt est obtenue avec la lampe type épi de maïs «Maslux» d'Onlux. Cette valeur peut être considérée comme la meilleure valeur absolue et se situe nettement au-dessus de l'efficacité d'une lampe économique (environ 60 lumens par watt).

Philips 12 W 806	Philips 7 W	Philips 3 W Bougie	Osram 12 W 810	Osram 8 W
				
Osram 4 W Bougie	Toshiba 5,5 W	Paulmann 7 W	Ledon 10 W	Evenlight 5,5 W
				
Barthelme 7 W	Noser 3,5 W	Led-Fox 12 W	Maslux 8 W	Lampe à incandescence 60 W
				

		Philips 12W 806	Philips 7W	Philips 3W Bougie	Osram 12W 810	Osram 8W	Osram 4W Bougie	Toshiba 5,5W	Paulmann 7W	Ledon 10W	Evenlight 5,5W	Barthelme 7W	Noser 3,5W	Led-Fox 12W	Maslux 8W	lampe à incandescence 60W
Puissance*	W	12,8	6,7	3,3	13,5	7,6	4,0	5,2	5,7	9,4	5,7	6,0	2,9	12,5	6,8	60,0
	W	12,0	7,0	3,0	12,0	8,0	4,0	5,5	7,0	10,0	5,5	7,0	3,2	12,0	8,0	
	%	+7	-4	+11	+12	-5	+1	-6	-19	-6	+4	-14	-10	+4	-15	
Flux lumineux*	lm	823	375	123	909	347	166	269	194	589	331	285	211	798	638	700
	lm	806	350	136	810	345	170	250	295	600	396	300	205		700	
	%	+2	+7	-9	+12	+1	-3	+8	-34	-2	-16	-5	+3		-9	
Efficience*	lm/W	64	56	37	68	46	41	52	34	63	58	47	74	64	94	12
	lm/W	67	50	45	68	43	43	45	42	60	72	43	64		88	
	%	-5	+12	-18	+1	+7	-4	+14	-19	+5	-19	+10	+16		+7	
Correspond à une lampe à incandescence*	W	61	34	14	66	32	18	26	20	47	31	27	22	60	50	60
	W	60	32	15	60	40	25			60	60	40		100	75	
	%	+2	+5	-7	+10	-21	-30			-22	-49	-31		-40	-33	
Température de couleur*	K	2670	2703	2398	2722	3126	3082	2623	2516	2710	3415	3515	3295	3116	2873	2700
	K	2700	2700	2700	2700	3000	3000	2700	2500	2700	ww	3000	ww	ww	2850	
		-1	+0	-11	+1	+4	+3	-3	+1	+0		+17			+1	
Rendu des couleurs Ra		81	81	91	86	82	84	88	78	92	66	92	68	55	64	100
R9 (rouge intensif)		14	32	77	66	19	25	51	-10	86	-21	88	-22	-89	-54	
Facteur de puissance		0,82	0,65	0,61	0,94	0,83	0,43	0,58	0,86	0,89	0,46	0,41	0,29	0,78	0,80	1,00
Gradabilité		oui	oui	oui	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non	non	non	oui
Part de lumière																
derrière	%	14	6	0	0	0	2	0	2	2	0	0	2	4	0	16
latéral	%	61	52	61	38	39	68	25	35	16	27	34	68	64	80	52
devant	%	25	42	39	62	61	30	75	65	82	73	66	30	32	20	32

* 1^{er} ligne: valeur déclarée, 2^e ligne: valeur mesurée

Peuvent être considérées comme bonnes les valeurs des lampes LED comprises entre 50 et 60 lm/W (statut janvier 2011). Pour les lampes de petite puissance, une valeur de 40 lm/W peut également être considérée comme bonne. La différence entre l'efficacité maximale (Onlux: 94) et minimale (Paulmann: 34), soit près de 3 fois moins, mérite d'être signalée.

■ L'indication de la **puissance équivalente de la lampe à incandescence** fait souvent l'objet d'une tricherie. La lampe «Evenlight» de la boutique en ligne de CVS prétend remplacer une lampe à incandescence de 60 watts mais ne diffuse de facto que la lumière d'une lampe à incandescence de 30 watts. A l'exception de Philips,

tous les fabricants indiquent de fausses données. La raison devrait se trouver dans la répartition lumineuse. Car les lampes diffusent souvent bien plus de lumière dans le sens de rayonnement que latéralement (pour en savoir plus, consulter le paragraphe «Répartition lumineuse»).

■ Une **température de couleur**, semblable à celle d'une lampe à incandescence, de 2700 kelvins pour une LED est faisable mais elle diminue l'efficacité des lampes. Le blanc plus froid des LED est plus efficace et moins risqué également en ce qui concerne la perception subjective. Les LED blanc chaud de 2700 kelvins peuvent diffuser une lumière «jaunasse», une LED de 3300 K est bien moins sujette à produire une

Illustration 82 (à gauche): Les 14 lampes LED et 1 lampe à incandescence du test de Kassensturz.

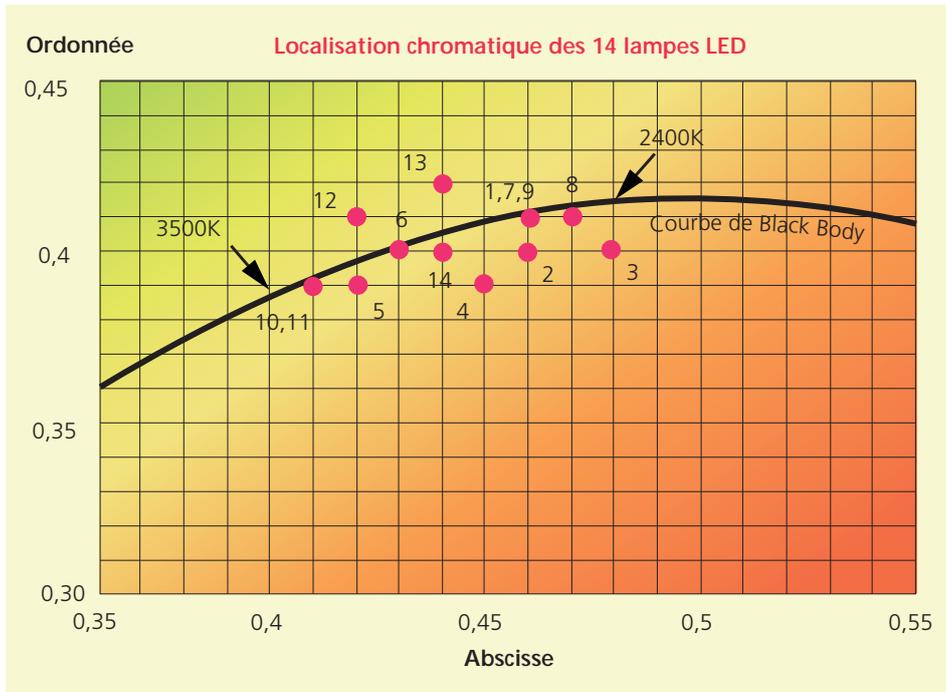


Illustration 83: Localisation chromatique des 14 lampes LED Retrofit mesurées (extrait du triangle des couleurs).

Illustration 84: Répartition de la lumière des lampes Retrofit sélectionnées (rouge = LED, bleu = lampe à incandescence 60 watts).

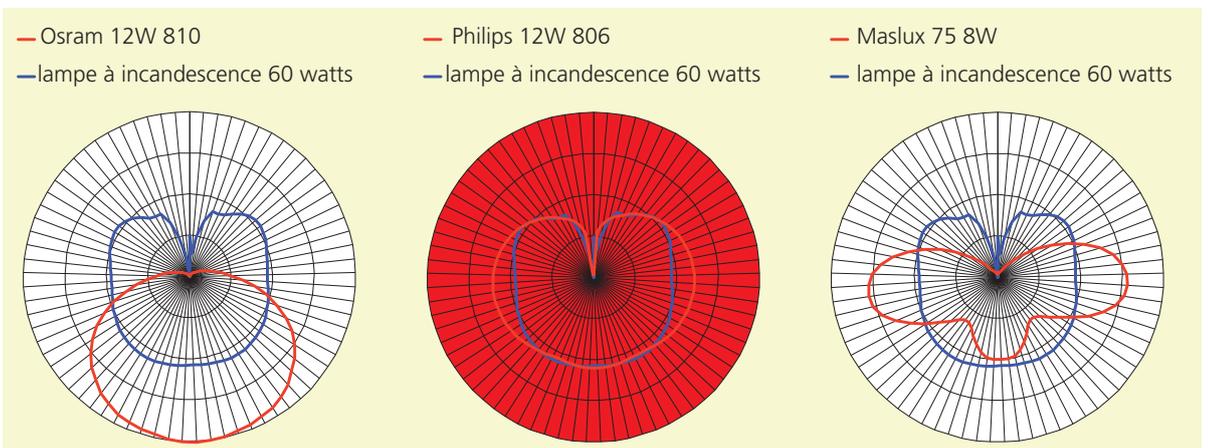


Tableau 41 (à gauche): Résultats de mesure des tests LED.

teinte non souhaitée. Les lampes de 2700 K testées ont heureusement convaincu avec leurs bonnes nuances de blanc.

■ Pour l'indice de rendu des couleurs R_a , une valeur de 80 est considérée comme bonne. La plupart des lampes fluorescentes utilisées indiquent un R_a de 80. Les lampes à incandescence et halogènes possèdent la valeur maximale de 100. Dans les essais menés avec les LED, les lampes présentaient des valeurs R_a comprises entre 55 et 92, donc de mauvais à très bon. Même si l'impact de la valeur R_a est toujours discuté dans les cercles spécialisés, elle est utile comme mesure de comparaison utilisable entre les valeurs de mesure très fortement divergentes des lampes LED. Pour les experts, la valeur R9 pour rouge vif donne d'autres indications sur la qualité du rendu des couleurs: les valeurs pendant les essais varient entre -89 (!) et +88. Une valeur R_a élevée pour le rouge est un bon indice de similarité de la lampe LED avec une lampe à incandescence.

■ Le facteur de puissance indique le rapport entre l'énergie active et l'énergie apparente. La puissance apparente est produite par la centrale électrique. Elle ne peut cependant pas être consommée. Un facteur de puissance de 1 signifie que la puissance active est égale à la puissance apparente et qu'aucune puissance réactive ne circule. Les lampes testées indiquent des facteurs de puissance compris entre 0,29 et 0,89. Conformément à la directive européenne 2005/32/CE pour les lampes domestiques, aucune exigence ne s'applique aux lampes LED. Pour les lampes économiques jusqu'à 25 watts, la valeur doit être au minimum de 0,5 et pour les lampes supérieures à 25 watts la valeur minimale doit être de 0,9. Pour les lampes LED, il faudrait viser une valeur de 0,9. Aucune des lampes LED Retrofit mesurée n'atteint cette valeur cible.

Répartition lumineuse

La comparaison des répartitions lumineuses des différentes lampes LED est intéressante. La plupart des produits de remplacement des lampes LED à incandescence possèdent une répartition lumineuse

nettement divergente de celle de la lampe à incandescence (Illustration 83). Donc, si une lampe LED est placée dans un luminaire à la place d'une lampe à incandescence classique, l'effet lumineux sera totalement différent dans plusieurs cas. Une lampe LED type, comme par exemple l'Osram 12 watts, diffuse la plus grande partie de la lumière vers l'avant. Placée dans un luminaire suspendu au plafond, cette lampe engendre donc une luminosité au sol qui correspond aisément à celle d'une ampoule à incandescence de 100 watts. Le plafond reste cependant dans le noir, en comparaison avec une lampe à incandescence de 60 watts. C'est différent avec la lampe LED de 12 watts de Philips: sa répartition lumineuse correspond pratiquement à celle d'une lampe à incandescence normale. L'effet lumineux reste donc pratiquement identique après le remplacement d'une lampe à incandescence. Les lampes épi de maïs représentent un troisième type de lampes qui sont agencées avec plusieurs LED sur un cylindre. Elles ne diffusent de la lumière presque que latéralement, ce qui signifie dans l'exemple du plafonnier que ce sont surtout les murs qui sont éclairés tandis que le plafond et le sol restent sombres.

Utilisées correctement, les trois variantes ont leur légitimité. Une caractéristique de rayonnement serait utile. Mais l'indication de la répartition lumineuse est généralement absente de la déclaration des lampes.

Localisation chromatique

La localisation chromatique et la couleur d'une source lumineuse peuvent être représentées dans l'espace chromatique. Plus la localisation chromatique est proche de la courbe Black Body, plus la nuance de blanc est nette. Plus la localisation chromatique est éloignée de la courbe, plus la teinte s'orientant vers le bleu, le jaune, le vert ou le rouge est fortement perceptible. Au cours de l'essai, les lampes 1, 6, 7, 8, 10 et 11 se trouvaient sur la courbe Black Body. Les autres types de lampes montrent de légères teintes (Illustrations 79 et 82).

Conclusion

La lampe LED combine les avantages de la lampe économique (grande efficacité, longue durée de vie) avec les avantages de la lampe à incandescence et de la lampe halogène (démarrage immédiat, gradabilité, lumière brillante). L'essai surprend par les très bons résultats des meilleures lampes, par exemple une très grande efficacité énergétique (jusqu'à 94 lumens par watt) et un très bon rendu des couleurs (jusqu'à R_a 92). L'essai montre également quelques zones problématiques. Il existe ainsi de grandes différences de qualité pour des prix de vente comparables, la déclaration est en bonne partie insatisfaisante, ce qui rend souvent impossible une comparaison directe.

Les prix de vente pour les lampes LED 12 watts se situent actuellement autour de 60 francs, les modèles 8 watts sont disponibles à moins de 40 francs. Ces prix sont bien trop élevés en comparaison avec ceux des lampes économiques d'efficacité à peu près égale. Malgré cela, les lampes LED peuvent être très rentables, en particulier lorsque la valeur ajoutée est considérée selon ses avantages face aux lampes économiques. Cependant, les consommateurs doivent actuellement s'accommoder de lampes LED dont la durée d'amortissement peut durer 4 ans ou plus. L'évolution des prix à court et moyen terme des lampes LED n'est pas claire. A long terme, les prix

devraient baisser de manière significative et les lampes LED suppléer durablement les lampes économiques. Sur le plan technologique, la tendance vers de plus grandes puissances va bien se poursuivre.

4.6 Charte de qualité pour les LED

Dans l'Union européenne, la consommation d'énergie pour l'éclairage domestique est estimée à environ 86 milliards de kWh/an. On attend une croissance faisant passer ce chiffre à 102 milliards d'ici à 2020. Comme la technologie LED se développe très vite et que les rédacteurs des normes européennes travaillent très lentement, un groupe d'experts prévoyants a créé une charte européenne sur les LED qui est certes facultative, mais qui crée les bonnes bases au bon moment.

Exigences d'efficacité

Les exigences d'efficacité permettent de différencier quatre types de lampes:

- Lumière à rayonnement large, indice de rendu des couleurs supérieur à 80 (abréviation: IRC en anglais ou R_a)
- Lumière à rayonnement large, indice de rendu des couleurs supérieur à 90
- Lumière dirigée (spots), indice de rendu des couleurs supérieur à 80
- Lumière dirigée (spots), indice de rendu des couleurs supérieur à 90.

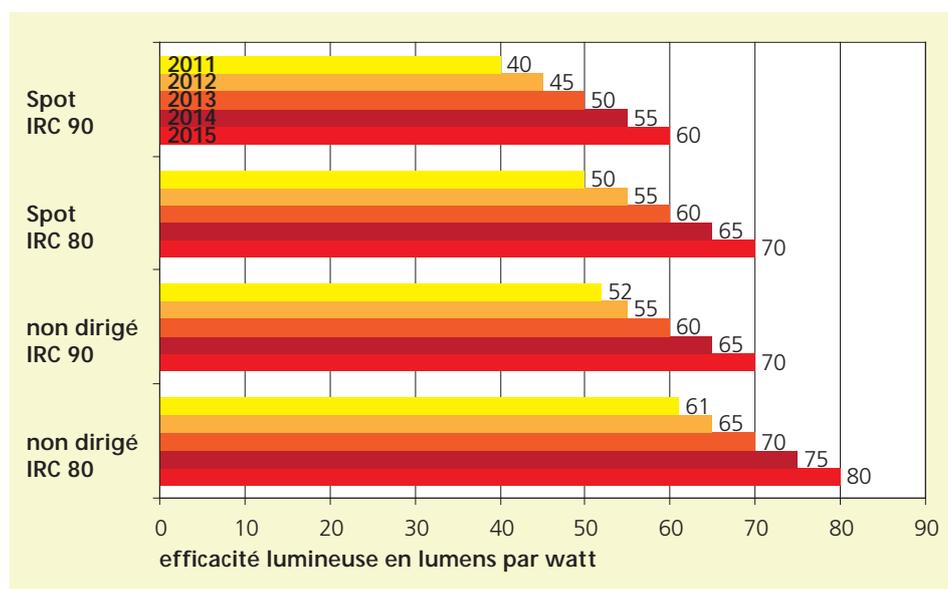


Illustration 85:
Exigences posées
aux lampes LED Re-
trofit selon la
charge de qualité
UE (IRC: Indice de
rendu des couleurs).

Les exigences seront renforcées au rythme des évolutions technologiques escomptées (Illustration 85).

Exigences de qualité des lampes LED

Retrofit

- **Durée de vie:** au moins 15 000 heures
- **Arrêt prématuré avant 1000 heures:** maximum 5 %
- **Durée de démarrage:** moins de 0,5 seconde
- **Indice de rendu des couleurs:** au moins 80
- **Température de couleur:** minimum 2600 kelvins, maximum 3500 kelvins
- **Facteur de puissance:** au moins 0,5
- **Scintillement :** pas de scintillement, en mode gradué non plus
- **Risque de lumière bleue:** classe de rayonnement 0 ou 1

Lumière bleue: Risque photochimique dans la rétine (risque de lumière bleue). Seul le rayonnement de longueur d'onde 380 à 1400 nm arrive sur la rétine de l'œil. Une irradiation plus longue avec une lumière de longueur d'onde de 380 à environ 600 nm peut entraîner un dommage photochimique de la rétine. En raison de sa forte concentration en énergie par rapport à la lumière à ondes longues, la lumière bleue a une action particulière sur l'organisme.

Assurance qualité

- **Garantie de remplacement en cas d'arrêt prématuré pour les consommateurs:** au moins 2 ans
- **Système d'assurance qualité du fabricant (ISO 9002).**

4.7 Idées fausses sur les LED

Des demi-vérités ou des contrevérités circulent également 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: Actuellement les diodes lumineuses blanches peuvent transformer 20 à 30 % 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 50 et 80 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 très important. Les meilleures LED ont une qualité de lumière comparable à celle des lampes halogènes. Néanmoins, ces LED sont encore assez coûteuses et ne sont absolument pas identifiables comme des LED. 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 (20 000 à 50 000 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).

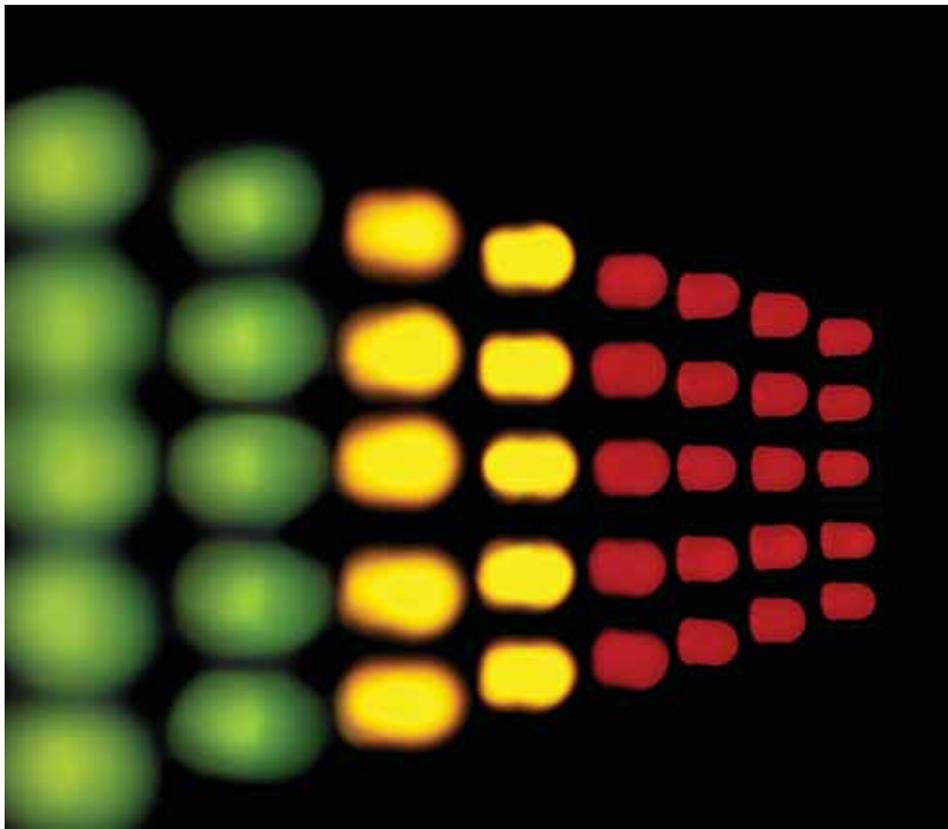
Ce qui est vrai: La couleur blanche des LED s'obtient en mélangeant les couleurs primaires. Cependant, la qualité de la lumière diminue, car il manque des éléments importants dans le spectre de couleurs. Les bonnes LED de couleur blanche sont la combinaison d'une LED de couleur bleue avec un revêtement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

■ **Affirmation 7:** A l'heure actuelle, l'éclairage par 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 (avec une durée de vie d'environ 10 ans). Pour le moment, les lampes Retrofit (LED sous la forme de lampes à incandescence ou halogènes) pour l'éclairage domestique ne sont pas économiques.

■ **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 disponibles dans le commerce étant conçus uniquement 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.



*Illustration 86:
Les LED existent
déjà depuis 50 ans.*

■ **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 électroluminescentes 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: Les couleurs de lumière des LED ne sont pas encore standardisées. Elles proposent toutes sortes de couleurs de lumière (blanche). Dans le cas des lampes LED exclusives, il est possible de définir avec précision la couleur de lumière souhaitée et de la modifier, si nécessaire. Le problème des différentes nuances de blanc devrait être résolu très prochainement.

■ **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.

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

Ce qui est vrai: Entre 2000 et 2010, l'efficacité énergétique des diodes électroluminescentes a été multipliée par 10 environ. Elle devrait raisonnablement doubler

au cours des 10 prochaines années. 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:** L'avenir est aux LED organiques (DELO).

Ce qui est vrai: Les LED organiques permettent d'obtenir des surfaces éclairantes. La technologie DELO 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.

■ **Affirmation 15:** L'industrie télévisuelle est en avance sur l'industrie de l'éclairage.

Ce qui est vrai: Sur l'ensemble des LED en vente, 50 % sont actuellement utilisées pour les téléviseurs (éclairage en contre-jour) et seulement 15 % pour l'éclairage. Mais ce rapport devrait s'inverser sur le long terme.

Luminaires

5.1 Luminaires professionnels et d'intérieur

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 200 francs), en raison d'une production située en Europe. En Suisse, environ 2 millions de nouveaux luminaires professionnels sont vendus et installés par an.

■ Les luminaires d'intérieur 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 d'intérieur ne sont pas évalués. Leur efficacité énergétique est plutôt aléatoire, les lampes mises à part, qui sont la plupart



Illustration 87:
Luminaires économiques d'intérieur de stockwerk3 (www.stockwerk3.ch).



Illustration 88:
Luminaires économiques d'intérieur
de Baltensweiler
(www.baltensweiler.ch).



Illustration 89
(colonne de gauche): Luminaires économiques d'intérieur de Belux (www.belux.ch).



Illustration 90 (en haut): Luminaires économiques d'intérieur de Philips, disponibles chez Coop-Lumimart et Bau & Hobby.

Illustration 91: Luminaires économiques d'intérieur de Hellinge (www.hellinge.ch).

du temps des lampes halogènes, économiques à vis ou encastrables. 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 d'intérieur. Les grossistes Migros et Coop utilisent ce service. Les luminaires d'intérieur sont en grande partie transformés à bas prix. Mais, comme ils seront vendus comme produit unique aux consommateurs, leur prix, entre 50 et plus de 500 francs, n'est pas plus bas que celui des luminaires professionnels.

■ 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 500 francs 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 suisses, on trouve entre autres Baltensweiler, Belux, Hellinge, stockwerk3 ou Neue Werkstatt.

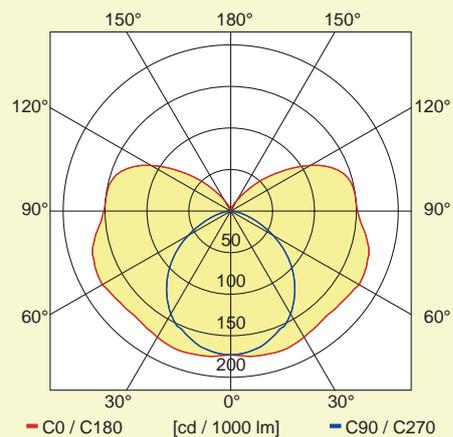


Illustration 92:
Plafonnier en applique

- Nom: Spinaquick
- Fabricant: Ribag
- Type: TL T16
- Lampes: 1/28 W
- Puissance: 34 W
- Flux lumineux: 2834 lm
- Efficacité: 83 lm/W
- Lumière directe: 71 %
- Minergie: RI-0011

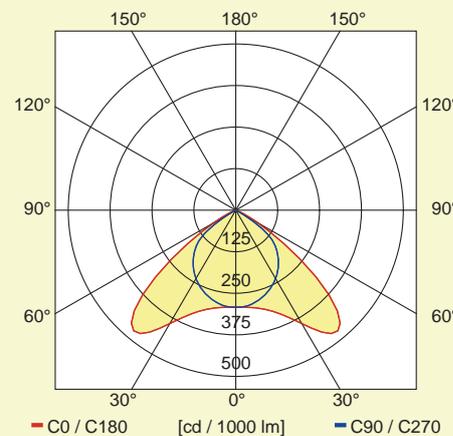


Illustration 93:
Plafonnier encastrable

- Nom: Nova
- Fabricant: Tulux
- Type: TL T16
- Lampes: 2/35 W
- Puissance: 80 W
- Flux lumineux: 5940 lm
- Efficacité: 74 lm/W
- Lumière directe: 100 %
- Minergie: Tu-0002

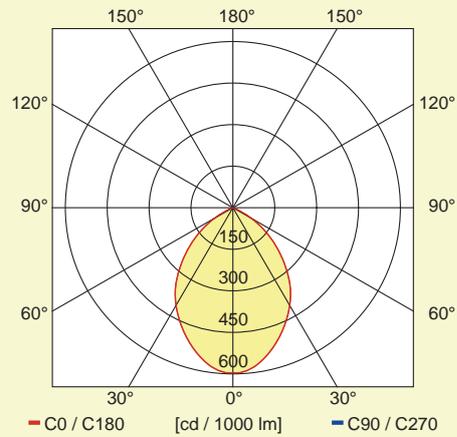
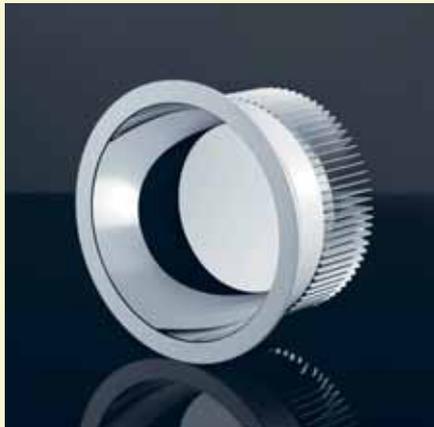


Illustration 94:
Downlight

- Nom: Panos
- Fabricant: Zumtobel
- Type: LED
- Lampes: LED
- Puissance: 36 W
- Flux lumineux: 2857 lm
- Efficacité: 77 lm/W
- Lumière directe: 100 %
- Minergie: Zu-0145

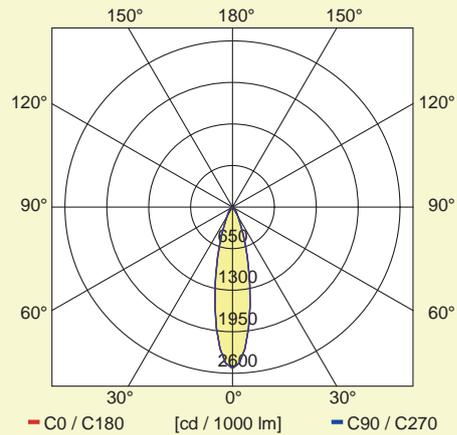


Illustration 95:
Spot

- Nom: Poco
- Fabricant: Regent
- Type: halogénure
- Lampes: 1/70 W
- Puissance: 79 W
- Flux lumineux: 4900 lm
- Efficacité: 77 lm/W
- Lumière directe: 100 %
- Minergie: Re-0033

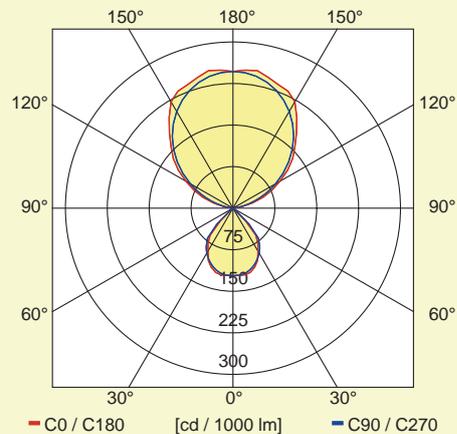


Illustration 96:
Luminaire sur pied

- Nom: Ecolit
- Fabricant: Balten-sweiler
- Type: Compact FLTC-L
- Lampes: 2/55 W
- Puissance: 108 W
- Flux lumineux: 8160 lm
- Efficacité: 76 lm/W
- Lumière directe: 21 %
- Minergie: Ba-0001

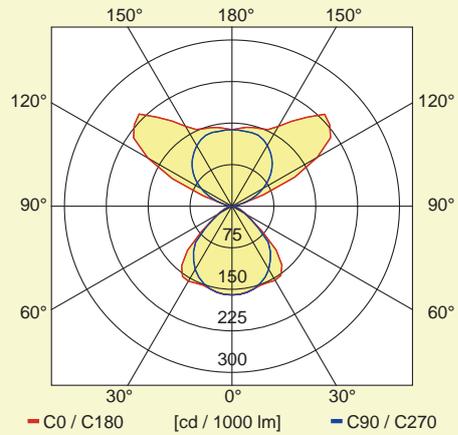


Illustration 97:
Luminaire suspendu

- Nom: Tycoon
- Fabricant: Waldmann
- Type: TL T16
- Lampes: 2/28 W
- Puissance: 61 W
- Flux lumineux: 5148 lm
- Efficacité: 84 lm/W
- Lumière directe: 37 %
- Minergie: Wa-0001

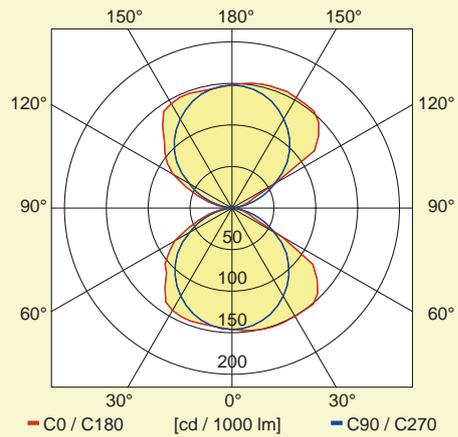


Illustration 98:
Applique

- Nom: Vanera
- Fabricant: Derungs
- Type: TL T16
- Lampes: 2/28 W
- Puissance: 61 W
- Flux lumineux: 4732 lm
- Efficacité: 78 lm/W
- Lumière directe: 50 %
- Minergie: De-0005

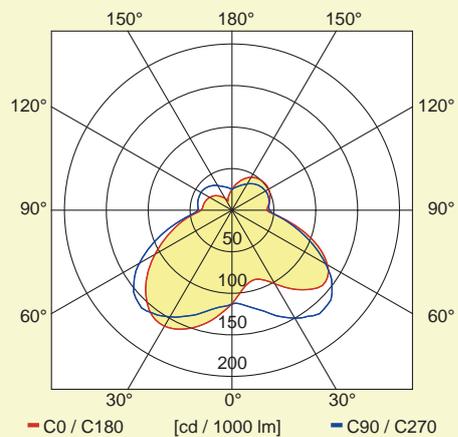


Illustration 99:
Luminaire de bureau

- Nom: Scope
- Fabricant: Belux
- Type: Compact FLTC-T
- Lampes: 1/13 W
- Puissance: 14 W
- Flux lumineux: 837 lm
- Efficacité: 60 lm/W
- Lumière directe: 73 %
- Minergie: Be-0011

5.2 Typologie

Les luminaires professionnels sont jaugés selon des critères de technologie lumineuse et peuvent donc être évalués. La première mission d'un luminaire est de diriger 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 diriger 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 où sont représentées les directions longitudinale et transversale. Selon la base de données en ligne de la société Relux (www.relux.com), environ 250 000 luminaires différents sont disponibles sur le marché européen. Les modèles les plus utilisés pour l'espace intérieur sont classés en huit catégories: plafonniers intégrés, plafonniers encastrables, downlights, luminaires suspendus, luminaires sur pied, spots, lampes de table et appliques. Les illustrations 92 à 99 présentent des exemples efficaces issus de la liste des luminaires des huit catégories certifiés par Minergie (www.toplicht.ch), la courbe de répartition lumineuse ainsi que d'autres caractéristiques.

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

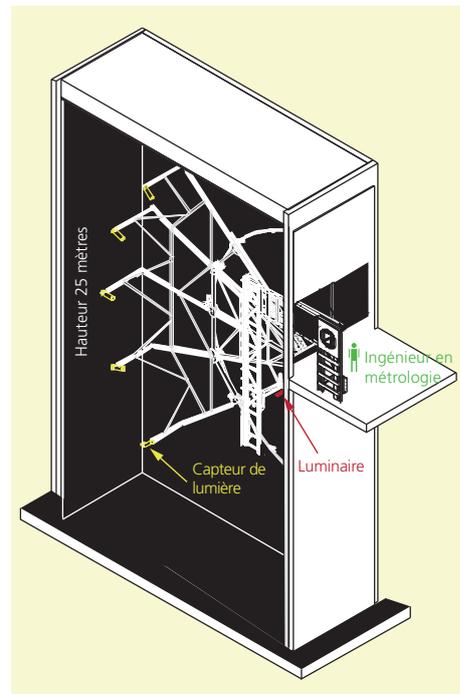


Illustration 100: Principe d'un photogoniomètre avec mouvement de la tête du photomètre (Zumtobel, Dornbirn).

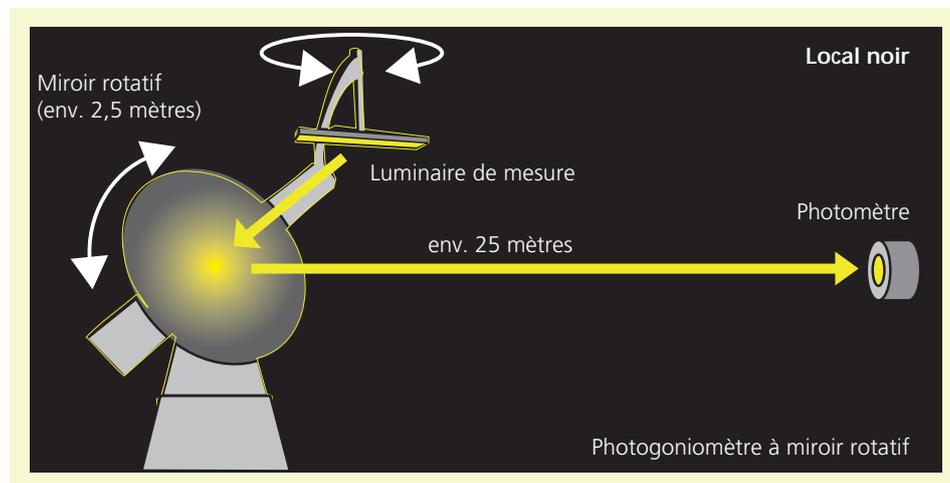


Illustration 101: Principe d'un photogoniomètre à miroir rotatif (Metas Berne).

avec la tête du photomètre et un protocole de mesure (normé sur une quantité de lumière de 1000 lumens) est établi. De manière caractéristique, ce sont 912 points de mesure (24 pas à 15° dans le plan horizontal et 37 pas à 5° de haut en bas) qui sont enregistrés et classés dans un fichier Eulum. L'extension *.ltd sera utilisée pour le traitement dans les programmes de simulation (Relux ou Dialux). Le fichier Eulum présente la courbe de répartition lumineuse en 3 dimensions. C'est «l'empreinte» individuelle d'un luminaire. A ce sujet, se référer aux exemples du paragraphe 5.2: typologie des luminaires (Illustrations 92 à 99). De grandes exigences s'appliquent aux mesures photométriques, même à température ambiante. Les conditions sont décrites avec précision dans la norme SN EN 13032 (Mesure et présentation des caractéristiques photométriques des lampes et des luminaires). Les valeurs électriques, le rendu des couleurs et les dimensions, entre autres, sont ajoutés aux données photométriques et classés dans un fichier Eulum.

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 lumi-

naires 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.

Facteur d'efficacité des luminaires (LEF)

Le produit tant du rendement du luminaire, du dispositif de fonctionnement que du luminaire lui-même est défini comme efficacité énergétique. Souvent, le facteur d'efficacité d'un luminaire est également désigné par l'abréviation «LEF» (Luminaire Efficiency Factor). Le rendement du luminaire en service (LOR = Light Output Ratio) désigne donc seulement une partie de l'efficacité d'un luminaire. Pour définir des critères d'efficacité, une analyse statistique de la base de données des luminaires de Relux a été effectuée. Pour cette analyse, 16 000 entrées de luminaires provenant des quatre grands fournisseurs de luminaires suisses Regent, Zumtobel, Tulus et Fluora ont été utilisées (Illustration 42, page 48). Seuls les luminaires équipés de lampes à décharge et de ballasts électroniques sont pris en compte. La sélection s'est donc basée sur des luminaires qui étaient déjà équipés des meilleures lampes et des meilleurs ballasts. Le facteur d'effi-

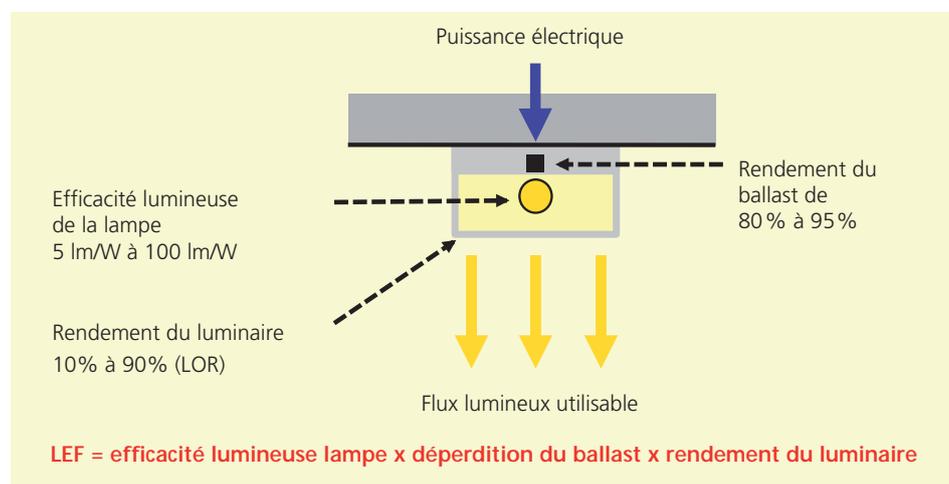


Illustration 102: Définition du facteur d'efficacité des luminaires LEF.

capacité dépend des lampes, différentes, et de leurs caractéristiques de répartition lumineuse. L'évaluation a donc été effectuée en tenant compte des lampes, des directions de rayonnement, des puissances et des dimensions (Illustration 103).

Exigences concernant le facteur d'efficacité des luminaires

L'évaluation de la base de données des luminaires de Relux pose les bases pour définir les exigences Minergie. En principe, seuls 20% au maximum des luminaires sont concernés par une certification.

■ Pour les tubes fluorescents, la différence réside dans la direction de rayonnement et leur longueur. Pour les six catégories de l'illustration 103, les exigences sont définies indépendamment de la puissance.

■ Pour les lampes compactes (lampe fluorescente, lampe aux halogénures métalliques et LED), la différenciation s'effectue de la même manière selon la direction de rayonnement et la classe de puissance. Pour les lampes de moins de 32 W, les exigences diminuent de manière linéaire (Ill.103).

Autres exigences

En plus des exigences concernant le facteur d'efficacité lumineuse, d'autres conditions techniques sont posées:

■ La puissance en mode veille doit être égale à zéro pour les luminaires sans système de réglage. Pour les luminaires avec système de réglage, on distingue les luminaires sur pied et les autres luminaires.

Pour les luminaires sur pied réglables, la veille doit être de 0,5 W maximum. Un prix de vente élevé s'explique par l'intégration d'un dispositif électromécanique de déconnexion du mode veille qui entre en fonction après une mise hors service automatique du luminaire.

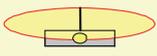
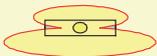
■ Seuls les luminaires possédant un coefficient d'éblouissement de 25 maximum dans un local standard peuvent être des luminaires Minergie. Les luminaires au rayonnement libre sans réflecteur sont donc exclus de la certification.

■ Pour les luminaires LED, d'autres exigences doivent être satisfaites. Indice de rendu des couleurs: au moins 80, durée de vie: au moins 20 000 heures, facteur de puissance analogue à celui des lampes fluorescentes (au moins 0,5 jusqu'à 25 watts, au moins 0,9 à partir de 25 watts).

Liste des luminaires Minergie

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. 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 qua-

Illustration 103:
Exigences minimales posées au facteur d'efficacité des luminaires Minergie.

Type de lampe	Tube fluorescent		LED	
	Longueur de construction < 600 mm	Longueur de construction > 600mm	Puissance < 32 W	Puissance > 32 W
indirect 	65 lm/W	70 lm/W	44 lm/W + 0,5 lm/W par watt	60 lm/W
	60 lm/W	65 lm/W	39 lm/W + 0,5 lm/W par watt	55 lm/W
direct 	55 lm/W	60 lm/W	34 lm/W + 0,5 lm/W par watt	50 lm/W

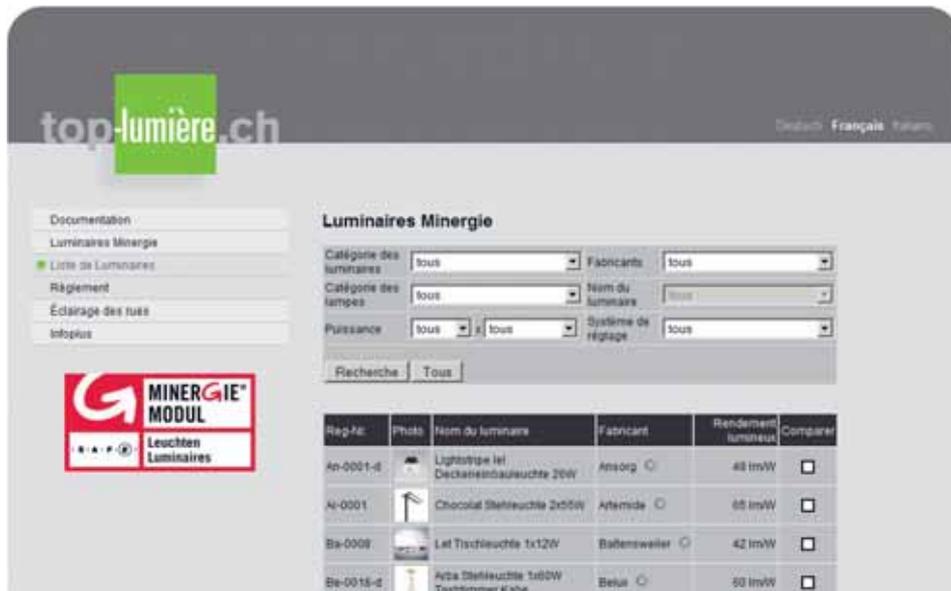


Illustration 104: Liste de luminaires sur www.toplicht.ch.



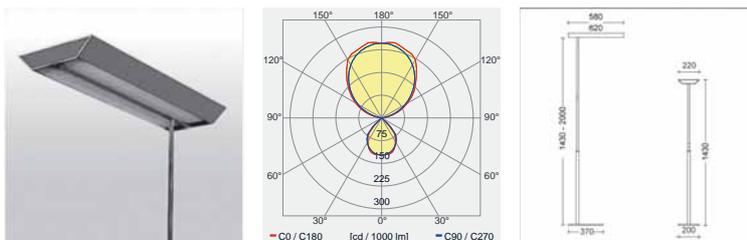
MINERGIE®-Leuchte

BALTENSWEILER

Reg.-Nr. Ba-0001-s
Reg.-Datum 04.12.2007

Eco Lit Stehleuchte 2x55W Parabol Eco Switch

Mit den lichttechnisch optimierten Reflektoren und den innovativen elektronischen Komponenten erweitert Eco Lit unser Eco-Büroleuchensystem. Der Zugschalter ist im Reflektorteil integriert. Er ist Bestandteil aller Eco Lit Reflektorvarianten mit oder ohne Sensorelektronik. Eine feine Saite führt zur bequem erreichbaren Schalterhülse. Je nach Wunsch kann Eco Lit mit oder ohne Bewegungsmelder resp. Lichtsensor gewählt werden. Der Zugschalter am Teleskopstativ lässt beide Varianten zu. Drei verschiedene Rastereinsätze bestimmen Lichtwirkung und Outfit von Eco Lit. Dem Planer ergibt sich durch die verschiedenen Modelle grosser Spielraum in ästhetischer und technischer Hinsicht.



Leuchtenkategorie	Stehleuchte
Lampenkategorie	Kompaktleuchtstofflampen
Artikelnummer	3502 S
Eingesetztes Vorschaltgerät	Philips HF-P 255 PLL EII 220-240
Verwendete Messlampe	PHILIPS PL-L 55W/840/4p
Anzahl Lampen pro Leuchte	2
Gemessene Leistung	108 W
Gesamtlichtstrom 25° (Lumen)	9600
Standby-Leistung	0.5 W
Integrierte Lichtregelung	Präsenz / Tageslicht
Leuchtenbetriebswirkungsgrad	85 %
Anteil Direktlicht	21 %
Abstrahlung	direkt-indirekt strahlend
Blendklasse UGR im Standardraum	<16 / <16 (längs/quer)
Max. Leuchtdichte über 65°	max. 150 cd/m ²
Leuchtenlichtausbeute (Anforderung)	75 lm/W (55 lm/W)
Original oder abgeleitete Messung	Original
Messdatum, Messingenieur	-
EULUMDAT-Datei	Ivk657_Eco_Lit_Parabol_2x55Wsym.LDT
Messlabor	METAS, Bern-Wabern

Illustration 105: Certificat d'un luminaire Minergie.

lité, 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 (Ill. 104).

Laboratoire 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
- Exigence posée aux luminaires Minergie au-delà de la norme SN EN 13032, concer-

nant le procédé de mesure pour les lampes fluorescentes de 16 mm de diamètre (T5) à 2 culots et les lampes fluocompactes à 1 culot

- 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

Fournisseur	Luminaires en applique	Luminaires encastrés	Downlights	Luminaires suspendus	Luminaires sur pied	Spots	Luminaires de bureau	Plafonniers	Total
Artemide					1				1
Baltensweiler					6		3		9
Belux				10	10		10	1	31
Derungs	2			2				1	5
Fluora				1	2				3
Huco				19	7				26
Küttel	2	2		6					10
Licht + Raum	2			8	3				13
Luxit					1				1
Luxo					1				1
Mabalux				2	3				5
Moos					1				1
Neuco	7	3		1	12			2	25
Prolux					2				2
Regent	27		1	34	19	3	6	2	92
Ribag	16			10					26
Ridi		1							1
Siteco	5			4	2				11
Tobias Grau					1				1
Trilux				17	11				28
Tulux		4		5	6				15
Waldmann				11	8				19
XAL	8	21		24	6				59
Zumtobel	55	44	65	36	22	12			234
Total des fournisseurs	124	75	66	190	124	15	19	6	619

Tableau 43:
Fournisseurs et types de luminaires Minergie.

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'éclairage lumineux est mesuré et confirmé à l'électronique de réglage en retour, la commande lumineuse fonctionne sans réaction directe (Illustration 106). Les réglages-type sont représentés par la régulation à lumière constante, le réglage marche-arrêt et la présence de détecteurs de la lumière du jour placés dans le local concerné.

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 mouvement font également partie des commandes. Certes, une présence dans le local est enregistrée et transmise au capteur en signal retour, mais comme ce n'est pas d'un signal de sortie (l'éclairage) à proprement parler qui est mesuré mais le mouvement, il s'agit d'une commande lumière.

Comme la plupart des détecteurs de mouvement et de présence (PIR) possèdent

également un dispositif de détection de la lumière du jour, le PIR type est aussi bien une régulation qu'une commande.

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.

Transmission du signal

Les informations sur la présence de personnes ou sur l'état de la lumière du jour doivent être transmises du détecteur 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 (fil de téléphone normal). 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

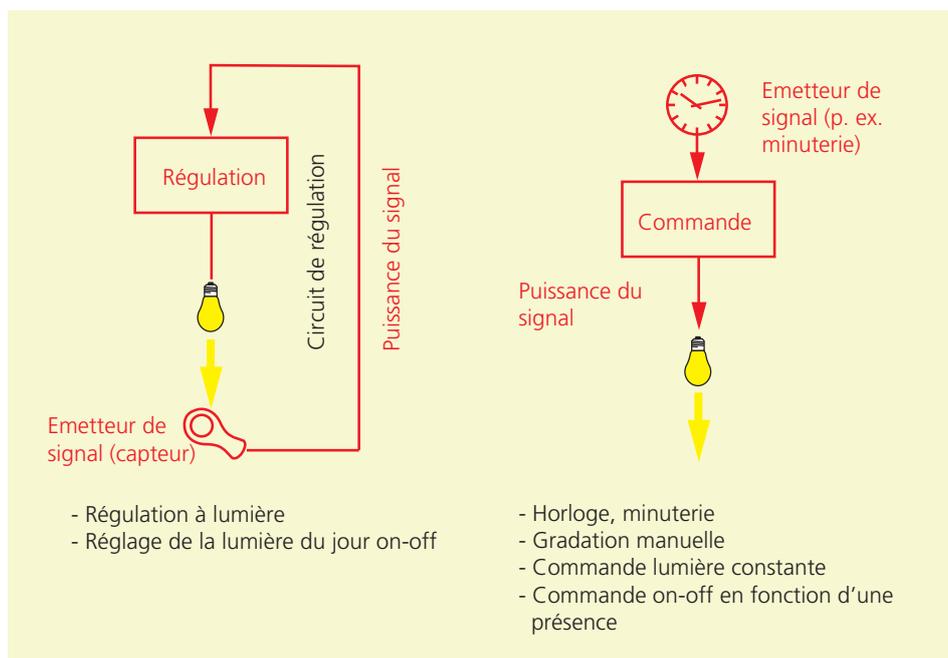


Illustration 106: Différence entre régulation et commande.

luminaire B. Les principaux protocoles réseaux :

- DALI: Digital Addressable Lighting Interface (Lumières et stores).
- EIB: Europäischer Installationsbus (Installation électrique domestique générale). La norme KNX remplace aujourd'hui EIB.
- LON: Local Operating Network (Installation électrique domestique générale).
- Luxmate: Solution réseau de la société Zumtobel.
- Digitalstrom: (Commande électrique domestique avec transmission de données via le réseau haute tension).
- LAN: Local Area Network (Réseau d'ordinateurs à l'intérieur d'un bâtiment).
- 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. 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 107) dans des systèmes d'automatisation de bâtiments (KNX, LON, LAN). DALI utilise un protocole de données asynchrone en série avec un taux de transmission 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.

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. Pour les capteurs de lumière du jour destinés à la gradation et à la régulation de la lumière constante, l'électronique de régulation est intégrée dans le ballast (DALI) du luminaire.

Illustration 107:
Appareil de commande (Gateway) pour participants DALI: luminaires, capteurs, interrupteur.



Illustration 108:
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 Capteurs

La technique d'éclairage implique quatre types de capteurs:

- Capteur infrarouge passif (PIR) pour l'enregistrement des mouvements (Illustration 109)
- Radar pour l'enregistrement des mouvements
- Cellule photoélectrique pour l'enregistrement de la lumière du jour
- Capteur d'images CCD pour l'enregistrement des mouvements et de la lumière du jour.

Capteur infrarouge passif (PIR)

Le capteur infrarouge passif sert à la détection et à la commande de l'éclairage artificiel en fonction des mouvements des personnes dans un local. Le PIR est en principe une simple caméra infrarouge comme celle qui est utilisée en thermographie. Le capteur ressemble à celui d'une caméra numérique, mais la résolution est relativement basse. Le PIR photographie à intervalles réguliers la pièce et compare les images entre elles. Dès qu'un pixel est modifié dans l'image, il avertit le régulateur qu'un mouvement se produit et que la lumière ne doit pas être éteinte. Lorsque l'image numérique infrarouge ne change pas, pendant 10 minutes par exemple, le capteur transmet au régulateur le signal d'extinction de la lumière.

Le capteur PIR enregistre non pas la lumière visible mais une image dans la zone infrarouge (IR). Des corps émettant de la chaleur ont un rayonnement plus fort dans la zone IR que les objets froids. Ainsi, l'identification des personnes est plus

simple que dans le spectre lumineux visible. Le PIR est passif, ce qui signifie qu'il n'émet pas de rayonnement, contrairement au radar, mais qu'il ne fait qu'enregistrer l'image (Illustration 110).

Les capteurs PIR sont aujourd'hui considérés comme la meilleure technique disponible et sont utilisés dans de nombreux bâtiments industriels mais également dans les ménages. Correctement placé et ajusté, le PIR est un dispositif fiable de détection de présence de personnes et donc de réglage de l'éclairage.

La technique PIR a toutefois des limites qui dans la pratique conduisent parfois à des réglages lumineux discutables.

- Plus le dispositif PIR est éloigné des personnes à détecter, moins l'enregistrement est précis. La technique utilisée avec la lentille diffusante à facettes doit être considérée comme trop peu performante à l'ère de la caméra numérique.

- Le PIR peut seulement enregistrer ce qu'il capte. Un mouvement de la main effectué par une personne derrière un grand écran ne peut pas être capté par le PIR.

- Le PIR capte des choses qu'il ne devrait pas voir. Selon son emplacement, il réagit par exemple si une porte de local reste ouverte et que des personnes, sorties de leur bureau, marchent le long du couloir.

- Le PIR réagissant au rayonnement de la chaleur, il peut par exemple interpréter une imprimante laser comme une personne. Une imprimante laser ayant des variations de température, elle génère pour le PIR une



Illustration 109:
Exemples de PIR:
montage mural, au
plafond ou sur in-
terrupteur.

Illustration 110:
Les personnes pho-
tographiées avec
une caméra IR ont
un visage rouge.



source de chaleur changeante (donc une «personne»).

■ A cela s'ajoute le problème esthétique du PIR: de nombreux architectes le trouvent horrible et le relèguent dans le coin le plus reculé du local. Mais de là, le PIR ne capte pas grand-chose. Contrairement au détecteur d'incendie, très ressemblant, et qui est installé au milieu du local, le PIR n'est pas souvent placé au meilleur endroit. A propos d'esthétique, plus la tête d'enregistrement du PIR est grande, moins l'enregistrement est précis.

■ Les lampes fluorescentes ne doivent pas être commutées en intervalles inférieurs à 10 minutes. Cela réduit le potentiel de réglage au moyen du PIR. Pour la technique LED, des intervalles d'une minute sont également possibles sans problème.

■ Après le montage, le PIR doit être réajusté, ce qui est souvent oublié avant la réception des travaux. Par chance, le réglage d'usine du PIR est configuré de manière adéquate.

Des études confirment également que le PIR permet de réaliser d'importantes économies dans les projets pilotes, mais le contraire n'est pas rare en fin de compte dans les bâtiments normaux en raison des obstacles décrits ci-dessus (se référer au paragraphe «Projet de mesure: efficacité des régulateurs»).

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

■ Où le PIR est-il utile? La fréquence de passage des personnes est-elle suffisamment faible pour obtenir un nombre suffisant d'intervalles de temps de plus de 10 minutes sans passages?

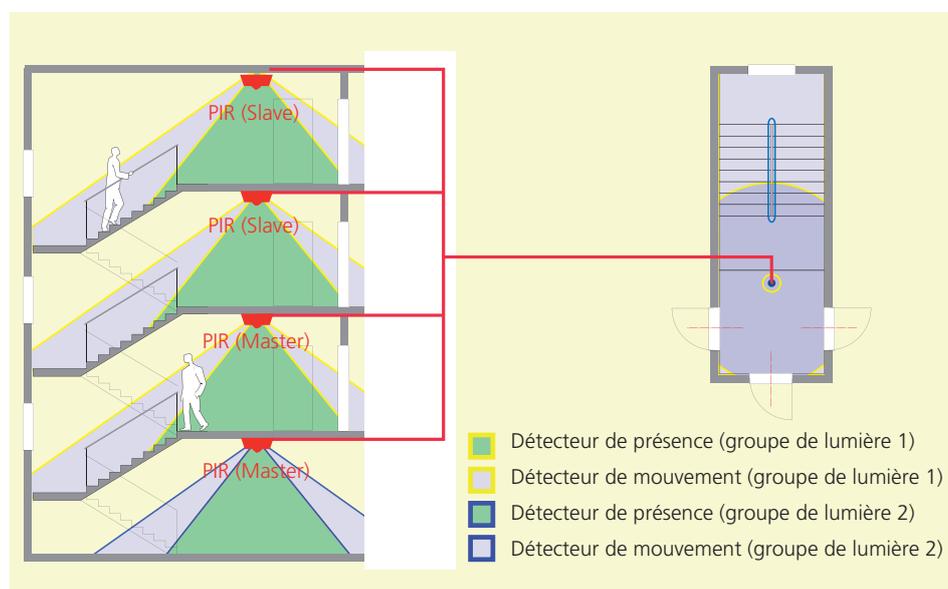
■ Quel PIR est utile? Il en existe plusieurs types: montage mural, au plafond ou montage en interrupteur. Quelle est la sensibilité nécessaire? L'industrie fait la différence entre détecteur de présence et détecteur de mouvement: le principe reste le même, mais c'est la sensibilité d'enregistrement qui fait la différence.

■ Sites et placement: Que capte et que ne capte pas le PIR? Le PIR doit être soigneusement placé comme un détecteur d'incendie! Swisslux; le fournisseur de détecteurs de présence propose dans un catalogue au format PDF sous www.swisslux.ch de nombreux accessoires utiles pour placer correctement les détecteurs de présence.

■ Quels PIR doivent être commutés en parallèle? Capteur principal en master, capteurs annexes en slaves. Quels capteurs doivent effectuer le réglage séparément (master sans slave)?

■ Eloignement: Les fabricants indiquent les zones d'enregistrement qui doivent être considérées comme distances idéales. La résolution du PIR diminue fortement avec la distance (Illustration 112).

Illustration 111:
Exemple de planification PIR dans une cage d'escalier (Swisslux).





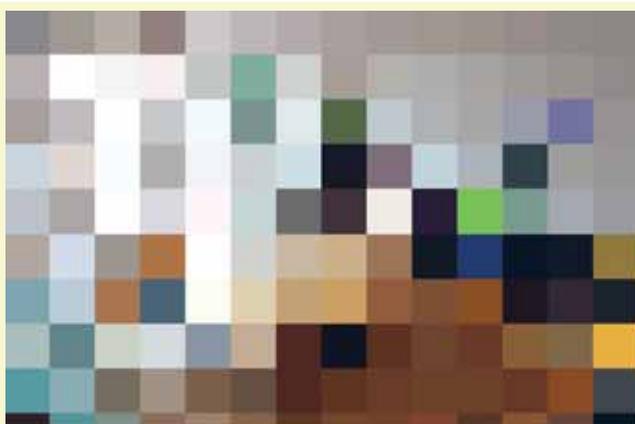
Vue d'un bureau avec un appareil photo numérique à trois mètres de distance



La même vue avec un PIR à trois mètres de distance



Vue d'un PIR lors du doublement de la distance visuelle à six mètres: la précision est très fortement réduite (même extrait que l'image ci-dessus)



A neuf mètres de distance, le PIR est inefficace (même extrait que l'image ci-dessus).

*Illustration 112:
Avec un PIR la précision diminue très fortement avec la distance.*

■ Ajustement et contrôle de fonctionnement: quel que soit le coût, chaque PIR doit être ajusté et testé.

■ Si possible, le PIR doit être réglé en mode semi-automatique. Ainsi, le PIR se déconnecte automatiquement et doit être reconnecté manuellement. Le mode semi-automatique empêche les enclenchements par erreur pour les personnes situées en dehors de la zone d'enregistrement souhaitée ou pour d'autres sources de chaleur comme la photocopieuse ou l'imprimante laser.

■ Existe-t-il d'autres alternatives au PIR? Exemples: commandes lumineuses comme minuterie (dans une cage d'escalier), horloge (dans un couloir) ou interrupteur à clé amovible (dans une salle de sport). Dans certaines circonstances, le type de com-

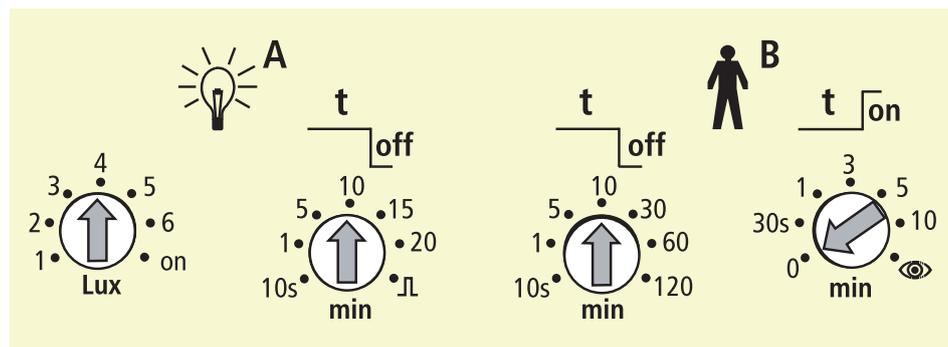
mandes ci-dessus est plus efficace sur le plan énergétique.

La sensibilité, même des meilleurs PIR, est limitée. Selon l'état actuel de la technique, les capteurs infrarouge passifs devraient en fait être remplacés par des caméras numériques.

Radar pour l'enregistrement des mouvements

En plus des PIR, on utilise occasionnellement des capteurs radar pour détecter une présence. Ils peuvent enregistrer les mouvements de manière plus précise que les PIR et ne réagissent pas aux sources de chaleur immobiles comme les imprimantes laser. Le fabricant de luminaires Waldmann utilise, surtout dans des luminaires sur

Illustration 113:
Schéma de réglage
en combinaison
avec un capteur de
présence-lumière
du jour (HTS The-
ben).



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 différencie 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 44:
Avantages et inconvénients des différentes positions des sondes de lumière du jour.

ped, ce type de capteurs à haute fréquence. Le radar n'est pas passif contrairement au PIR. Tout comme les mesures de vitesse dans la circulation routière, le radar émet un signal haute fréquence et reçoit le signal réfléchi dans un certain délai. Ce délai permet de calculer la vitesse ou de détecter des mouvements. Les capteurs radar agissent également à travers les murs, mais cette propriété limite donc fortement leur utilisation comme détecteur de présence.

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 114). 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 directe-

ment 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 (Position 4, Illustration 113) soit réglés sur la luminosité maximale, par sûreté (Position 6, Illustration 113). 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

Illustration 114: Capteur de toiture pour commande lumineuse constante (Zumtobel).



Illustration 115: Enregistrement précis du local au moyen d'un capteur CCD et du traitement de l'image.

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.

Capteur d'images CCD (pour l'enregistrement des mouvements et de la lumière du jour)

Le capteur infrarouge passif a été inventé à une époque où la photo numérique n'était pas encore connue ou alors était très coûteuse. La technologie du PIR semble dépassée à l'heure actuelle, car les capteurs d'images CCD de haute résolution sont disponibles à bas prix (CCD = charge coupled device). Pour le moment, aucun capteur de lumière utilisant la technique moderne des CCD n'est disponible sur le marché.

Avantages de la technique CCD

■ Très haute résolution et donc très grande zone et très grande précision d'enregistrement (Illustration 115)

■ Moins de capteurs nécessaires, moins de perte d'énergie

■ Enregistrement de présence et de la lumière du jour avec un seul capteur

■ Le traitement de l'image permet une définition exacte de la zone d'enregistrement

■ Pas d'enregistrement erroné des imprimantes laser ou de personnes situées en dehors de la zone d'enregistrement définie

■ Ajustement simple via un logiciel et un écran PC.

6.3 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, 10 à 50 % 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

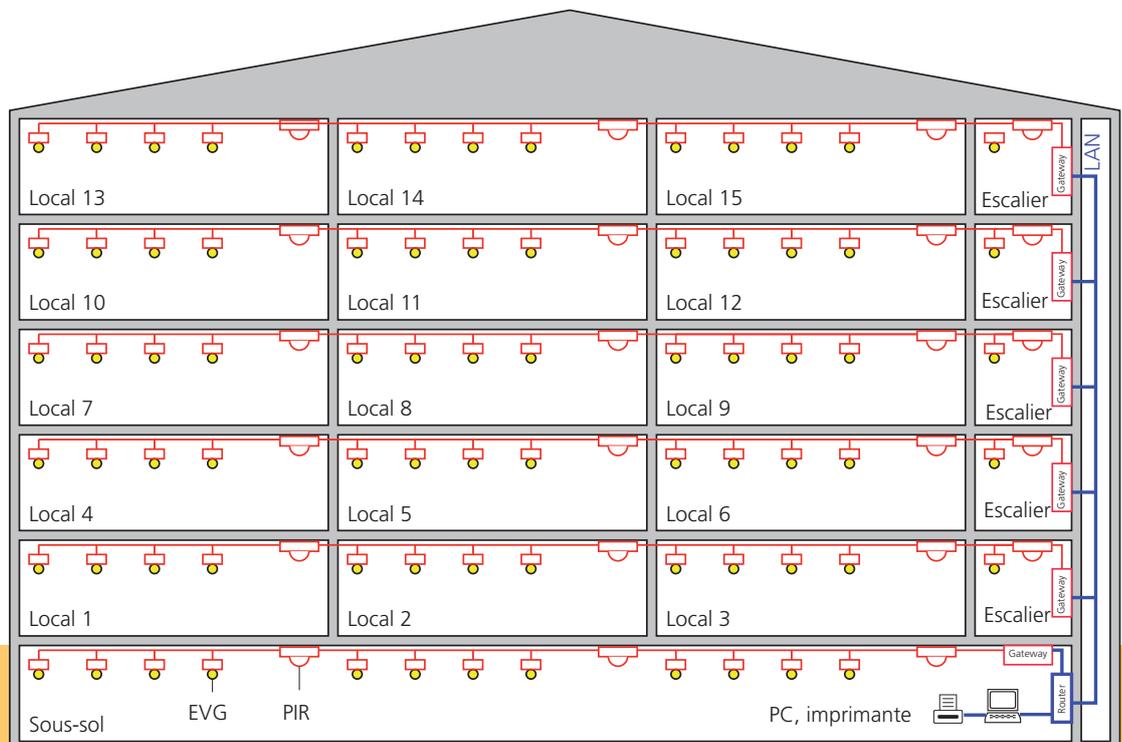


Illustration 116:
Composants de la
gestion de la lumière.

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 380/4, 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 380/4, 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 qualité 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 45).

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.

	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 45: Comparaison des variantes et de leurs effets sur la consommation d'énergie.

6.4 Efficacité des réglages (projet de mesure)

Le modèle de calcul pour le nombre d'heures à pleine charge de la norme SIA 380/4 a été créé sur la base de mesures et de simulations effectuées par ordinateur et simplifiées de sorte qu'il soit adapté aux planifications. En réalité, quelle est la précision de ce modèle d'heures de fonctionnement dans la pratique et avec quelle fiabilité fonctionnent les réglages dépendant de la lumière du jour et de la présence? L'Office cantonal de l'industrie des bâtiments de la ville de Zurich a tenté de répondre à ces questions en 2007 en menant une campagne de mesure sur 46 installations d'éclairage dans onze écoles.

Campagne de mesures

Au début du mois de juillet 2006, des appareils de mesure avec enregistreur de données ont été placés sur 46 installations d'éclairage sélectionnées dans onze écoles de la ville de Zurich. Les enregistreurs ont été directement fixés aux luminaires, à une distance de 2 à 5 cm de la lampe (Illustration 117). Les enregistreurs ont généré des niveaux d'éclairage toutes les 15 minutes. Les 156 jours de mesure au total ont permis d'enregistrer 1,4 million de valeurs de mesure.

Résultats

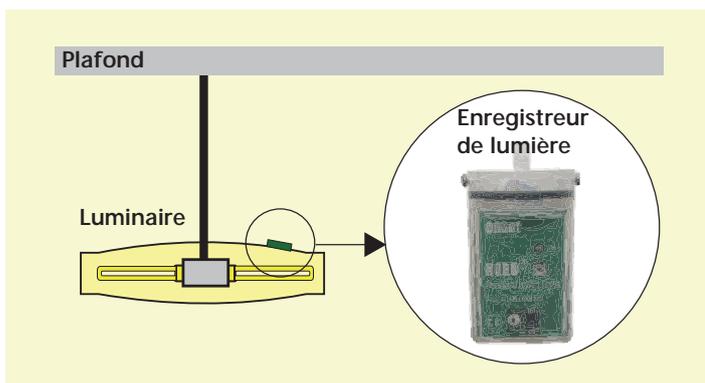
Un premier résultat de l'évaluation des données fournit le rapport entre le rayonnement global (lumière naturelle) et la lumière artificielle dans les locaux avec lumière du jour. L'illustration 118 montre le tracé du rayonnement global entre juin et

décembre 2006 (courbe rouge: données de Météo Suisse). De plus, les durées de fonctionnement de l'éclairage artificiel sont représentées pour deux salles de classe différentes. La courbe bleue est le résultat pour une salle de classe bénéficiant d'une commande de régulation selon la lumière du jour fonctionnant bien: plus la lumière naturelle est présente, plus les heures de fonctionnement de l'éclairage artificiel sont courtes. Les week-ends ainsi que les vacances scolaires d'été et d'automne sont également très bien visibles. De même, une commande dépendant de la lumière naturelle est installée dans la salle de classe indiquée par la courbe de mesure grise. Une relation selon la saison et les conditions atmosphériques ne peut cependant pas être établie. Par conséquent, cette commande ne fonctionne pas comme prévu.

Les détecteurs de présence (PIR) dans les salles de classe fonctionnent bien la plupart du temps

Selon l'évaluation des données de mesure issues des salles de classe avec détecteurs de présence et commutation dépendant de la lumière du jour intégrée (PIR), les économies attendues dans la plupart des classes étudiées ont été effectivement réalisées. L'illustration 119 montre de manière exemplaire la répartition des flux lumineux qui ont été enregistrés pendant six mois dans une salle de classe avec détecteurs de présence et dans une autre salle de classe sans détecteur de présence. Le trait vertical compris entre 15 et 70 % de flux lumineux donne le nombre d'heures à pleine charge. Au-delà de 70 % de flux lumineux, il devient évident qu'une lampe allumée n'émet pas toujours la même quantité de lumière. Selon la durée d'allumage et la température de la lampe en service, de plus grandes fluctuations peuvent apparaître. L'être humain ne peut toutefois pas percevoir ces fluctuations. La plus petite différence encore perceptible pour l'éclairage lumineux est de l'ordre de 1,5. En dessous de 15 % de flux lumineux, l'influence de la lumière du jour parvenant sur le capteur fixé sur le luminaire est visible.

Illustration 117: Installation de mesure sur 46 luminaires dans onze bâtiments scolaires de la ville de Zurich.



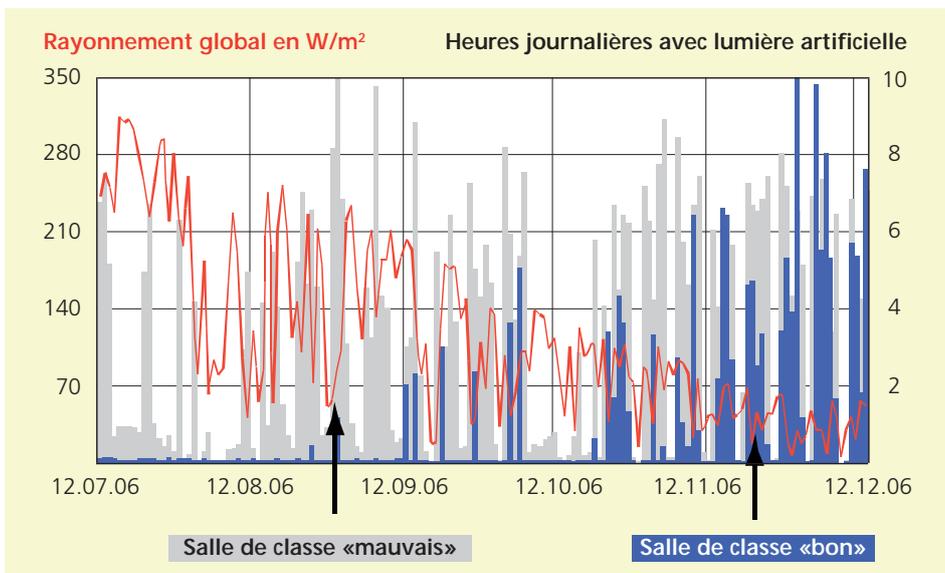


Illustration 118: Variation annuelle du rayonnement global et des heures de fonctionnement de l'éclairage artificiel dans deux salles de classe différentes avec une commande dépendant de la lumière du jour et de la présence.

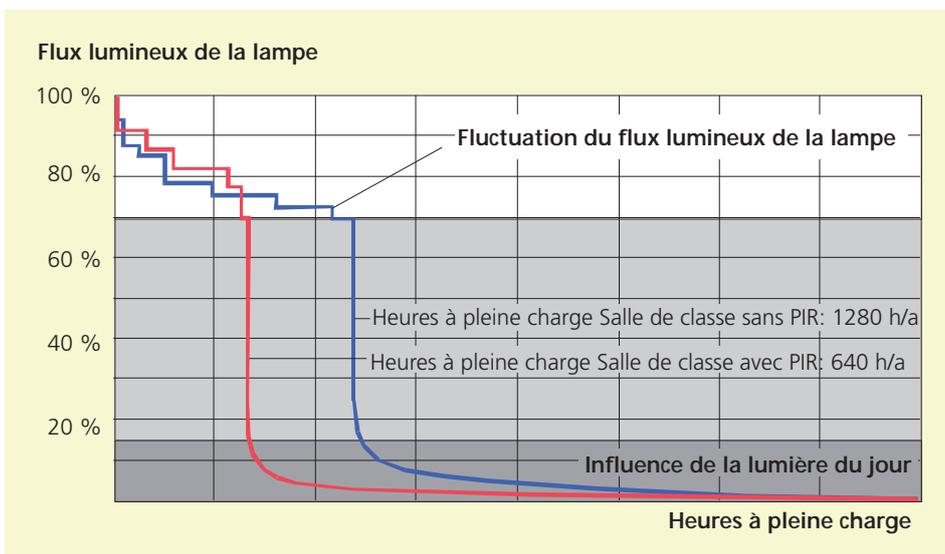


Illustration 119: Mesure des heures à pleine charge pour l'éclairage dans deux salles de classe, avec et sans détecteur de présence.

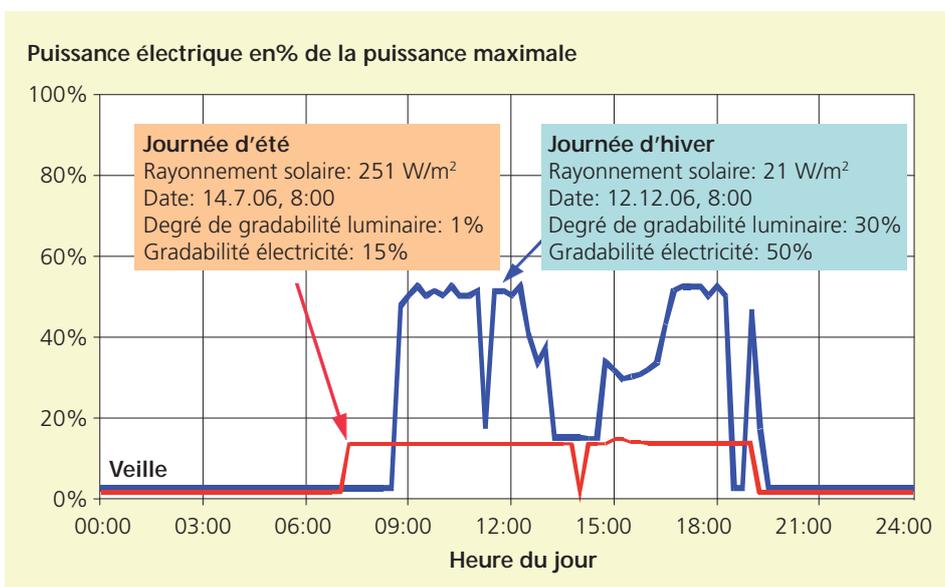


Illustration 120: Profil journalier de la puissance électrique en cas de réglage de la luminosité constante.

Grâce à l'utilisation de détecteurs de présence, il est également possible de démontrer d'importantes économies dans les zones de passage borgnes. Dans huit couloirs, les valeurs de mesure se situaient en moyenne à 1750 heures à pleine charge, la valeur limite SIA 380/4 (sans PIR) se situe à 2870, la valeur cible avec PIR à 1720 heures à pleine charge par an. L'évaluation des mesures pour les couloirs avec lumière du jour pendant la journée donne des résultats non satisfaisants. Les valeurs de mesure se situent, avec tout de même 1560 heures à pleine charge, au-dessus de la valeur limite SIA 380/4 de 1260 heures à pleine charge. L'analyse des capteurs PIR dans le couloir en a révélé la cause. De nombreux capteurs n'ont pas été ajustés et montés avec le seul réglage d'usine (300 à 500 lux) au plafond.

Bilan: Il faut impérativement exiger l'ajustement des capteurs de lumière du jour, sinon les commutations dépendant de la lumière du jour n'apportent rien dans les zones de passage, si ce n'est des dépenses.

Les réglages de la lumière constante ont leurs défauts

Deux écoles ont fait l'objet de mesures avec un réglage de la lumière constant: la lumière artificielle est continuellement graduée, de sorte que l'éclairage lumineux (somme de la lumière artificielle et de la lumière du jour) a toujours la même valeur sur le plan de travail. En théorie, ce type de réglage lumineux devrait fournir une économie d'énergie maximale. Mais dans la pratique, deux aspects techniques s'ajoutent à cela, réduisant fortement l'effet d'économie des réglages de la lumière constante:

- La consommation de veille en mode déconnecté et
- La performance disproportionnée avec une gradation faible.

Dans la campagne de mesures, les puissances électriques ont certes été mesurées, mais la caractéristique puissance-flux lumineux et les puissances en mode veille des ballasts graduables ont été déclarées bonnes par les fabricants, de sorte qu'une conversion en puissance électrique effec-

tive en fonction du flux lumineux, respectivement du niveau de gradation, est simple.

L'illustration 120 montre la puissance électrique absorbée d'un réglage de lumière constante sur deux jours sélectionnés, l'un en été et l'autre en hiver. Les puissances dissipées en mode veille des ballasts sont bien visibles pendant la nuit sur les deux jours. Durant le jour d'hiver non ensoleillé (courbe bleue), le pourcentage de lumière artificielle varie entre 20 et 50%: le réglage atteint parfaitement son objectif. C'est autre chose en été (courbe rouge): par cette belle journée ensoleillée du 14 juillet 2006, il n'y a pas eu besoin de lumière artificielle. Le réglage a permis à la lumière artificielle de rester à un faible pourcentage. Ces 2 à 3% de flux lumineux ont engendré une puissance électrique absorbée de 15% de la puissance maximale. Dans le cas le plus défavorable (locaux avec moins de 1000 heures d'utilisation par an), les installations de lumière constante ont donc consommé plus d'énergie qu'elles n'en ont économisée. Une solution est nécessaire et également possible dans tous les cas:

- Déconnecter le mode veille du réglage par commutation contacteur dans le tableau électrique en dehors des heures de fonctionnement ou utiliser les ballasts avec de très petites pertes (plus petite 0,3 watt).
- Éviter les valeurs de gradation de l'éclairage inférieures à 20% et placer les luminaires pour ce mode de fonctionnement en mode veille ou les déconnecter complètement.

L'installation et la mise en service des réglages de lumière constante sont nettement plus exigeantes que dans le cas des commutations de lumière du jour simples. Dans la campagne de mesures de la ville de Zurich, le réglage de la lumière constante a bien fonctionné dans l'une des deux écoles étudiées, mais pas dans d'autres bâtiments. Le scepticisme des grands maîtres d'ouvrage, comme la ville de Zurich, est donc de mise en ce qui concerne les réglages de la lumière constante.

Bilan: Les débats vont bon train sur les potentiels d'économie des réglages et des détecteurs de présence dépendant de la lumière du jour. Du côté de l'industrie, des mesures impressionnantes sont souvent présentées montrant combien les économies d'énergies avec ce type de réglage sont élevées. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que des économies allant jusqu'à 50% ne peuvent vraiment être réalisées que dans des conditions optimales de lumière du jour, d'installation et de mise en service correctes. Pour l'évaluation de la situation de la lumière du jour, l'outil de calcul de la SIA concernant l'éclairage est un instrument fiable (en vente sous www.energytools.ch).

La campagne sur la lumière du jour a été menée en 2006, lorsqu'aucune installation d'éclairage LED n'était encore disponible à grande échelle. En 2011, cela a beaucoup changé: de plus en plus, des parties de bâtiments ou des bâtiments entiers ont été équipés de la technologie LED. Celle-ci offre l'avantage d'être sans perte et rapidement graduable, contrairement aux lampes fluorescentes. Avec l'utilisation des LED, les problèmes mentionnés ci-dessus ont été en partie résolus avec le réglage de la lumière.

6.5 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 Miner gie, 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 122) 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'éclairement 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 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 121). Dans les deux couloirs, les éclairages lumineux et les répartitions lumineuses 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.

- 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,

Illustration 121: Appareil de mesure de l'énergie et de la puissance avec enregistreur de données pour carte SD.



Illustration 122: Vue intérieure du centre administratif Werd (couloir).

d'en moyenne 13,2 h/d pour l'éclairage avec des lampes fluorescentes à 5,7 h/d 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 123 et 124). 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 au-

cune plainte n'a été enregistrée. A l'évidence, les employés n'ont remarqué aucun changement. A 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 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

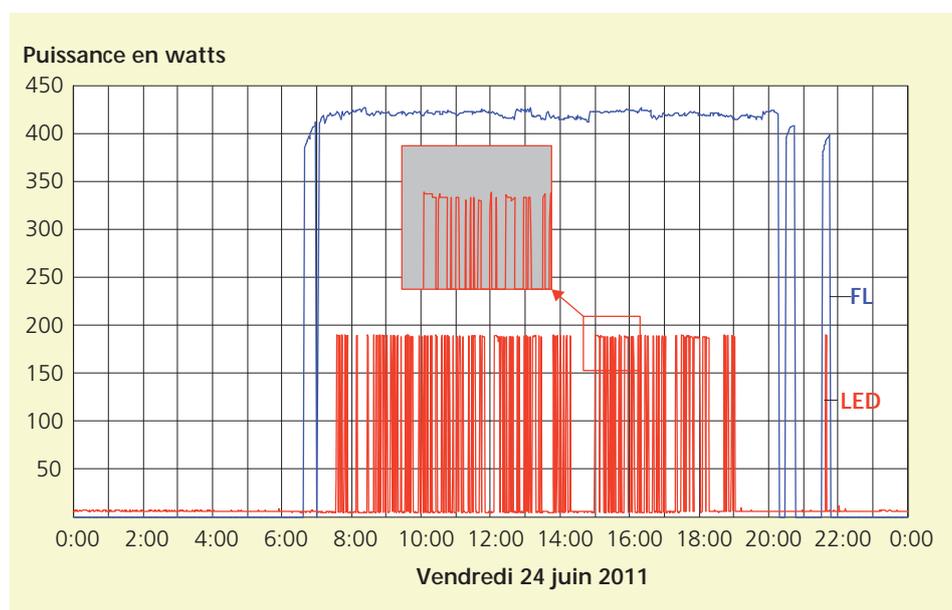


Illustration 123: Courbe journalière de la puissance lors d'une journée de travail usuelle; le couloir à LED consomme 81 % d'énergie de moins que le couloir avec lampes fluorescentes.

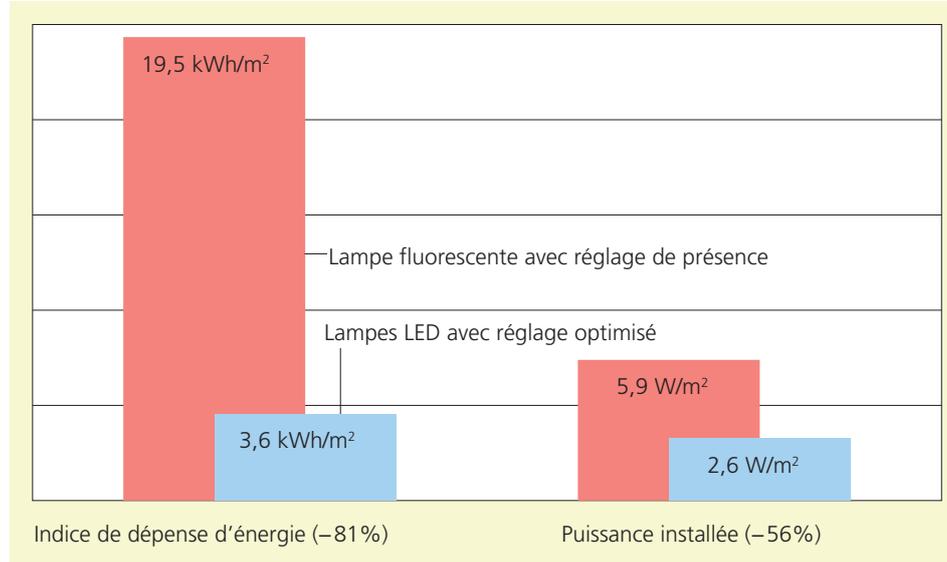


Illustration 124: 56 % d'économie de la puissance installée et 81 % d'économie de la consommation d'énergie.

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 Fr./m², ce qui correspond à 7.50 Fr./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 100 francs 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.

Bilan

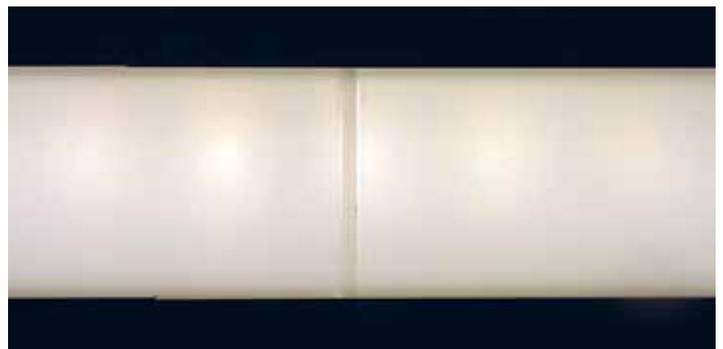
Ce résultat montre bien que la technologie LED présente, avec le réglage lumineux correspondant, un très important potentiel d'économies par rapport aux éclairages de couloir courants, considérés comme efficaces sur le plan énergétique. Par ailleurs, il faut noter que les réglages lumineux des

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 125).

Tableau 46:
Bilan énergétique
LED versus FL.

	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 0.80 Fr./m ² a	19,5 kWh/m ² 3.90 Fr./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 125:
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

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

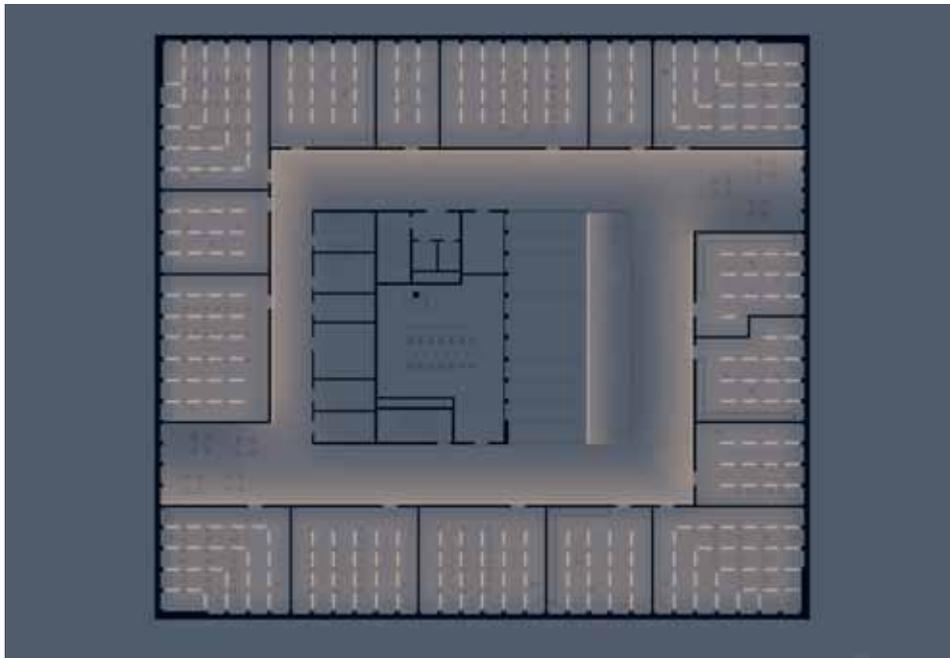
homogène, mais qu'elle dépend du lieu et du temps. L'ombre ou l'obscurité ou la zone d'ombre qui est volontairement utilisée pour donner un caractère propre à des locaux ou à des zones spéciales dans l'espace possède une valeur extrêmement importante.

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

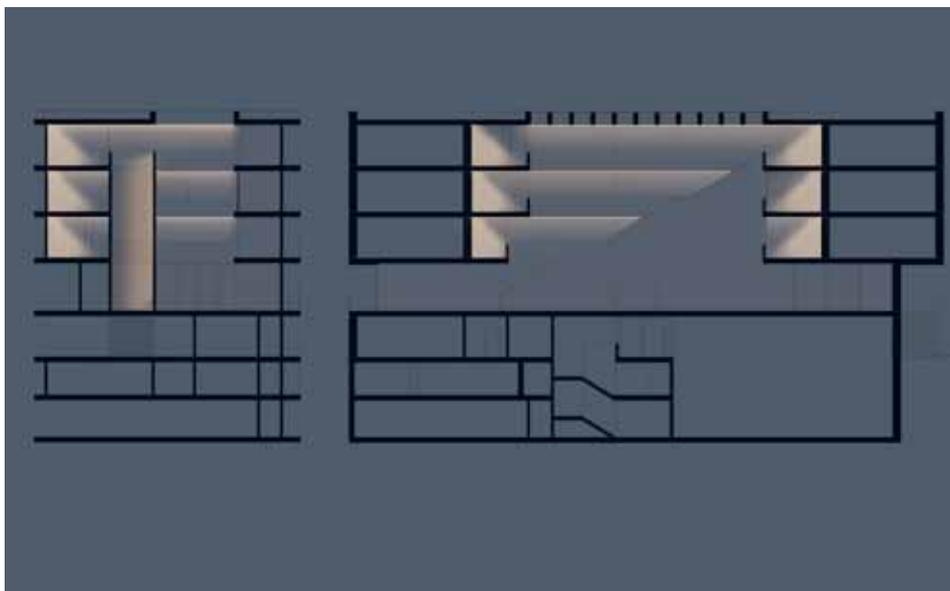
le ballast), Luminaire (réflecteurs, système optique, gestion thermique) et Espace (type de construction, dimensions du local et composition de la surface, degré de réflexion et de brillance). Cette expérience a généré une nouvelle compréhension de la succession de l'étiquette Energie en faveur du label 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 toutefois 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 spatiales jusqu'à la représentation 3D, mais également de simples plans de gris et des plans



*Illustration 126:
Plan gris avec illustration de l'éclairage.*



*Illustration 127:
Représentation en coupe de l'éclairage.*

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 et des 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 Exemple 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? 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?

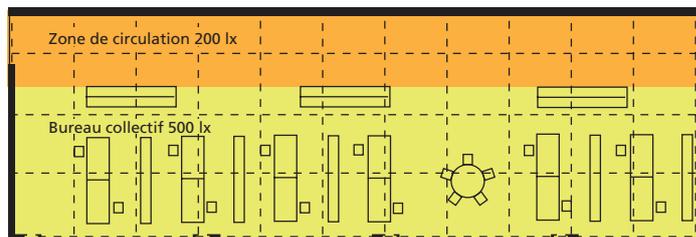
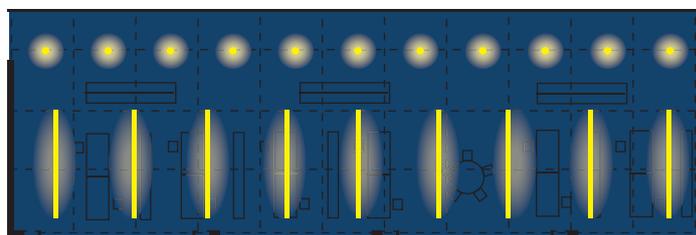
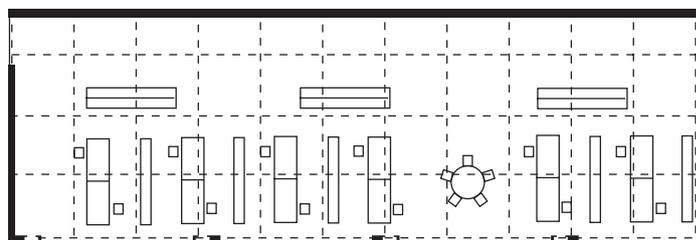
Il est évident que la valeur limite peut être atteinte de justesse. Des mesures d'optimisation sont alors nécessaires. Il est donc important que tous soient ouverts d'esprit, y compris le maître d'ouvrage. Le concepteur technique qui gère le justificatif n'est pas seul responsable, mais tous ceux qui 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 avec le planificateur-électricien et le maître d'ouvrage (surcoût) permet d'utiliser des capteurs de lumière du jour et des détecteurs de présence. Ce qui donne une image de la situation en raison de la réduction des heures à pleine charge.

D'autres entretiens suivent. L'architecte est prêt à peindre en blanc le plafond au lieu

Illustration 128:
Plan d'ensemble du bureau avec zone de circulation.

Illustration 129:
Disposition des corps d'éclairage (attention: zone d'éblouissement par réflexion dans le domaine de l'«éclairage au-dessus de la tête»!).

Illustration 130:
Attribution des zones selon la norme SIA 2024 (42 utilisations standard).



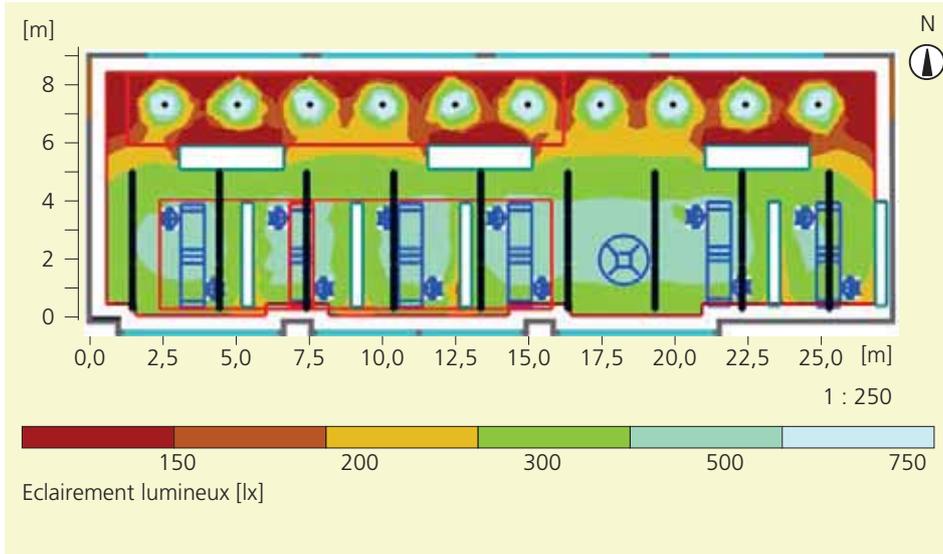


Illustration 131: Représentation des pseudo-couleurs du calcul d'éclairage avec gamme d'éclairage lumineux.

Illustration 132: 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 133: Tentative infructueuse d'atteindre Minergie.

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 keramisch abgestuften Aluminium-Strangpressprofil, Abmessungen 1500mm x 150mm x 50mm, Profilsternhöhe 34mm, Umlaufender symmetrischer Rahmen Breite=40mm, auf Gehängung geschliffen, Titan pulverbeschichtet, Lichtlenkung mit Zellenraster-Technologie, einzelne Rastermodule aus hochwertigem Verbundwerkstoff gleichmäßig vakuumbedampft mit Rasteraluminium, mit Schutzschicht aus SiO₂, Indirektleuchte Abstrahlcharakteristik (E-36) mit beidseitig gerichteter, breiter Lichtverteilung, Rückleuchten in abgestufter Gehäuseform LxBxH 100 x 70 x 32, Gewicht: 4,7 kg www.zumtobel.ch/42158824

Leuchtenkategorie	Pendelleuchte
Lampenkategorie	Leuchteschiff führen
Artikelnummer	42158824
Einbauelemente	EVO digital Tridronic one-dial
Vereinstellte Messlampe	T16/49
Anzahl Lampen pro Leuchte	2
Gemessene Leistung	110 W
Gesamlichtstrom 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 (Blickpunkt)
Max. Leuchtdichte über 65°	max. 978 cd/m ²
Leuchtdichtebauweise (Anforderung)	89 lm/W (85 lm/W)
Original- oder abgeleitete Messung	Abgeleitet
Messdatum, Messreferenz	EUTIMDAT-Datex
Messort	MEFAS, Bern-Webern

ERCO Parscan Strahler
für Halogen-Metalldampflampen

72136.000 Volt (EAL8002)
Hf-Ce 35W (12 33000)
EVO
Spotreflektor

Produktbeschreibung
Einmalig zerlegt geliefert, Aluminium, pulverbeschichtet, zum Lampeneinsatz durchbohrte Ø 50° schwenkbar, Kollimator, in den Zylinder integriert: Ausleger Aluminiumguss, pulverbeschichtet, am 3-Phasen-Adapter 30° drehbar. Eine Schraube zum Fixieren des Deck- und Nebengehäuses, nicht geeignet für Gegenlichter.
EBC 3-Phasen-Adapter Kurztakt, Schutzglas, Beschichtung: Aluminium, schwarz pulverbeschichtet, Aufhänger für Zubehör, Schutzglas: Aluminium, überdünnt, hochglanzlackiert.
Gewicht: 100g

Nm	EB4	D[m]
1	33270	0,36
2	8318	0,31
3	3607	0,47
4	2079	0,61
5	1331	0,79

Montage:
ERCO 3-Phasen-Stromschleife
Hf-Ce 3-Phasen-Stromschleife
Mangol 3-Phasen-Stromschleife
L-Phasen-Perleausbau

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

Projekt: **Waha AG**
Industriestrasse 9
8050 Zurich

Projekt-Typ: **Neubau**

Projektstand: **Projekt**

Bauherr: **Waha AG**

Architekt: **Martin Mustermeyer architekten Zürich**

Elektroplanung: **Amstein + Walther AG**
Zürich

Beleuchtungsplanung: **Amstein + Walther AG**
Zürich

Ersteller Nachweis: **Amstein + Walther AG**
Zürich

Datum: **09.11.2008**

Zusammenfassung

Flächen		Vorprojekt	Projekt
Nettofläche			255 m ²
Energiebezugsfläche (EBF)			290 m ²
Faktor Nettofläche zu EBF			0,91

Systemanforderungen

Vorprojekt	Projektwert	Grenzwert	MINERGIE	Zielwert
kWh/m ²				
Mülm ²				
MWh				
Projekt kWh/m ²	26,3	25,7	14,0	10,1
Mülm ²	86,0	84,1	45,8	33,0
MWh	6,7	6,5	3,6	2,6

MINERGIE ECO Vorprojekt | Projekt: **54%**

MINERGIE **grün = erfüllt** | **rot = nicht erfüllt**

Definition MINERGIE Beleuchtung

Grenzwert ← 3/4 | 1/4 → Zielwert

MINERGIE 1

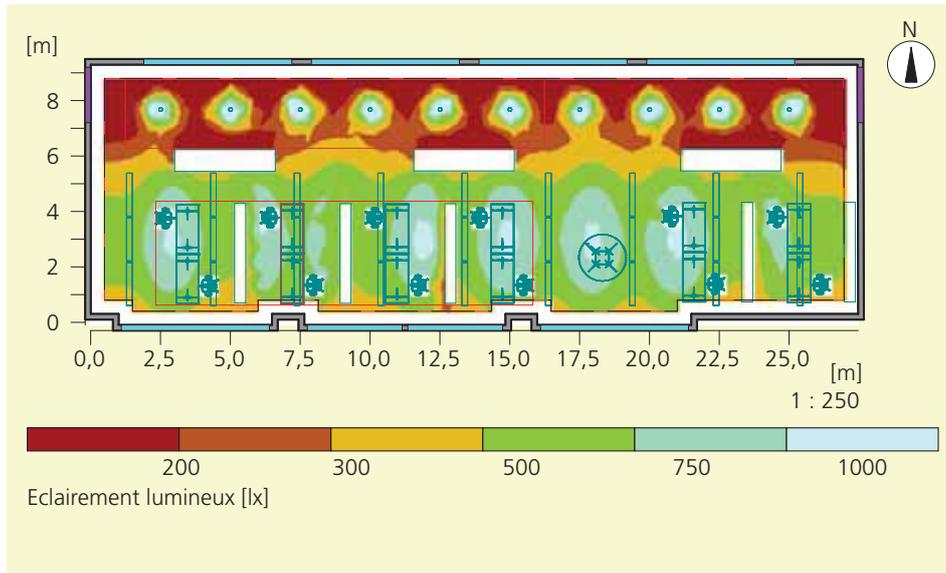


Illustration 134: Le nouveau calcul de la répartition lumineuse montre un éclairement lumineux aux places de travail, malgré une puissance plus faible.

Arano

TPS412 2xT15-35W/840 HFD CB-VN-SMS-ALU
Pendelleuchte mit DLC-Microdimming, klar lackiert.
Rohr-Gehäuse aus eloxiertem Aluminium, strahlend
mit regulierbarem DALI-LED und T15-Lampen (2x35W/840)
mit Dipper-Schaltung und Antriebskabel.

Prüfungswerte: DL-Abstrahlwinkel mit 3D-Luminaire aus
überdurchschnittlichem Brennweitenbereich.
Bündelgrenzfehler nach DIN EN 12464-1
($\Delta < 200$ oder bei 60°)

Lieferung inklusive Leuchtmittel,
Schalung und Antriebsleitung
im Metallgehäuse.
Schutzklasse I, Schutzart IP 20, ENEC CE, F-Zeichen, CE-Zeichen

Technische Daten

Beleuchtung: 2 x T15-35W
Leistung: 840
Leuchtröhre: 6600 lm
Umlaufzeit: 70 076
Beleuchtungsgrad: 99 076
Anschlussspannung: 77-0 W
Vorschaltgerät: 18F ballastierbar
Maße (L x B x H): 1552 x 206 x 45 mm
Gewicht: 5,3 kg

Lichtstärkeverteilung

Blendungsbegrenzung

PHILIPS
© 2011-2019 Philips Lighting - Professional Lighting Solutions
Tel: +49 (0) 180-888 200 - www.philips-lighting.com

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 keramisch abgestuftem Aluminium-Strangpressprofil, Abmessungen 1500mm x 150mm x 50mm, Profillochweite 34mm, Umlaufender symmetrischer Rahmen Breite=40mm, auf Gehung geschliffen, Titan pulverbeschichtet, Lichtlenkung mit Zellraster-Technologie, einzelne Rastermodule aus hochwertigem Verbundwerkstoff gleichmäßig vakuumbedampft mit Fliesenaluminium, mit Schutzschicht aus SiO2, Indirekt/direkte Abstrahlcharakteristik (64:36) mit batwingförmiger, breiter Lichtverteilung, Baldachin in abgestufter Gehäuseform LxBxH 100 x 70 x 32, Gewicht: 4,7 kg www.zumtobel.ch/4215624

Leuchtkategorie Pendelleuchte
Lampenkategorie Leuchtdioden
Antriebsnummer 4215624
Einseitiges Vorschaltgerät EVS digital Tridonic one-4all
Verwendete Messlampe T16/49
Anzahl Lampen pro Leuchte 2
Gemessene Leistung 110 W
Gesamlichtstrom 25° (Lumen) 8600
Standby-Leistung 0,5 W
Integrierte Lichtregelung Dimmung
Leuchtbetriebswirkungsgrad 89 %
Anteil Direktlicht 37 %
Abstrahlung direkt/indirekt strahlend
Blendklasse UGR im Standardraum <16 (Längs/Squer)
Max. Leuchtdichte über 60° max. 978 cd/m²
Leuchtdichtebausatz (Anforderung) 69 lm/W (69 lm/W)
Original oder abgeleitete Messung Abgeleitet
Messdatum, Messingenieur 02/26/14/08
EUKIMDAT-Daten
Messlabor METAS, Bern-Wabern

Illustration 135: 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.

Illustration 136: 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
Eclairement 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, Industriestrasse 9, 8050 Zürich

Projekt-Typ: Neubau

Projektstand: Projekt

Bauherr: Waha AG

Architekt: Martin Mustermeyer architekten Zürich

Elektroplanung: Anstern + Walther AG, Zürich

Beleuchtungsplanung: Anstern + Walther AG, Zürich

Ersteller Nachweis: Anstern + Walther AG, Zürich

Datum: 09.11.2008

Zusammenfassung

Flächen

	Vorprojekt	Projekt
Nettofläche		256 m ²
Energiebezugsfläche (EBF)		280 m ²
Faktor Nettofläche zu EBF		0,91

Systemanforderungen

Vorprojekt	Projektwert	Grenzwert	MINERGIE	Zielwert
kWh/m ²				
TU/m ²				
MWh				
Projekt kWh/m ²	15,5	25,7	14,0	10,1
MWh	50,8	84,1	45,8	33,0
MWh	4,0	6,5	3,6	2,6

MINERGIE ECO: Vorprojekt: [] Projekt: [54%]

MINERGIE: grün = erfüllt, rot = nicht erfüllt

Definition MINERGIE Beleuchtung

Grenzwert ← 3/4 → 1/4 → Zielwert

MINERGIE ↑

TECTEURS 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 commutations 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 élé-

ments de commande ne présentent pas encore ce niveau technique. Les réticences concernant la mise en réseau font le reste.



Illustration 140: Couloir éclairé de façon conventionnelle (en haut) et mise en œuvre du concept Human-Sensitive-Lighting (en bas).

7.3 Utilisation de la lumière du jour et régulation

La lumière du jour est de nouveau à la mode. Dans le cadre de l'optimisation énergétique, au moyen de la norme SIA 380/4 et avec la mise en œuvre de Minergie-Eco, l'utilisation de la lumière du jour est redevenue populaire. Pendant longtemps, en raison du faible prix de l'énergie, le monde artificiel de l'espace intérieur a été développé à la perfection sur le plan technique. Seules les normes et les lois ont contrecarré ce monde parfait avec des dimensions minimales de fenêtres et un revêtement extérieur prescrit comme exigence d'hygiène minimale.

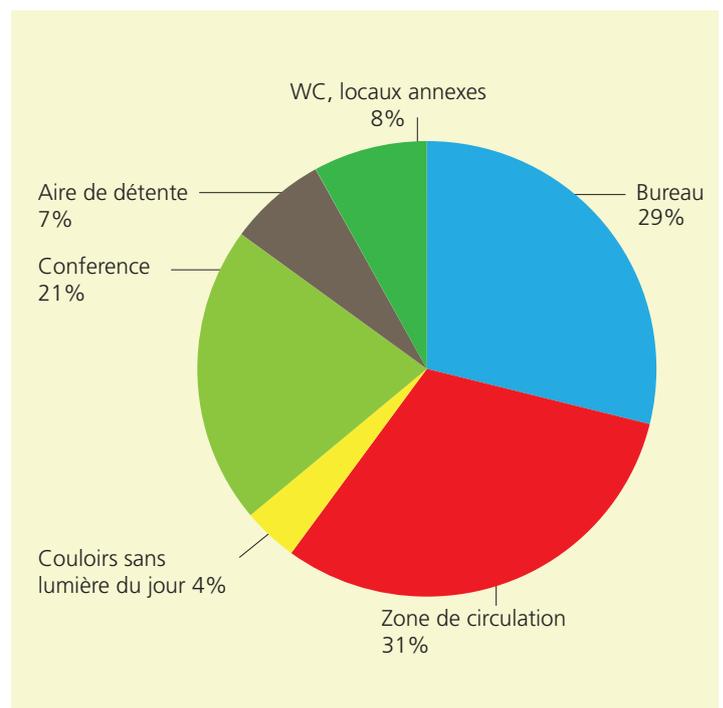
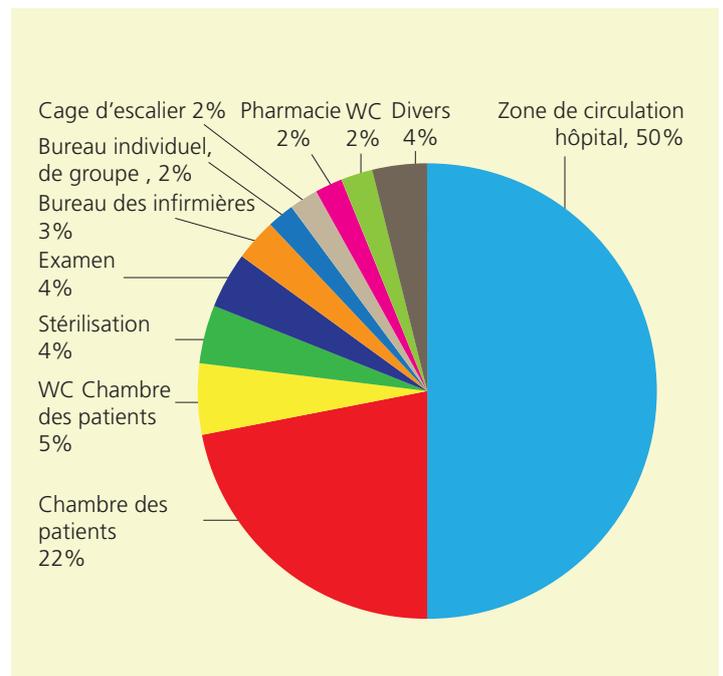
Et à quoi cela ressemble-t-il aujourd'hui? Bien plus satisfaisant, du moins du point de vue de la planification de l'éclairage. Même si des phrases comme «suffisamment de lumière du jour» apparaissent toujours dans les appels d'offres, le fait que la lumière du jour est précieuse est bien reconnu de tous.

Illustration 141: Distribution de l'énergie nécessaire à l'éclairage, dans l'exemple de l'hôpital Triemli.

Les apports extérieurs et l'influence de la lumière du jour ainsi que le terme «autonomie de la lumière du jour» connaissent une renaissance. Dans la pratique, ce sont les nouveaux types de vitrage avec sélectivité élevée, développés à l'université de Bâle. De nouveaux systèmes de protection contre le soleil et également des systèmes combinés donnent à la lumière naturelle l'importance qui lui revient et la règle de telle façon que de vraies augmentations de rendement apparaissent.

Le lissage d'un niveau lumineux est naturellement utile d'un point de vue énergétique. Dans les bâtiments ayant de plus en plus de profondeur, l'éclairage artificiel est nécessaire dans les zones éloignées de la lumière du jour, comme solution à une tâche visuelle. Pour déterminer l'autonomie de la lumière du jour sur la base du quotient de la lumière du jour, les mesures et les profils d'utilisation sont indispensables. Mais il existe également des méthodes d'évaluation graphique simples utiles dans le processus de conception. Le trajet du soleil doit être déterminé pour

Illustration 142: Consommation d'énergie pour l'éclairage dans un bâtiment de bureaux ou administratif (exemple).



chaque site. C'est ainsi qu'apparaissent les diagrammes de position du soleil spécifique par endroit.

A l'aide des méthodes d'évaluation graphiques des illustrations 147 à 152, il est possible de réaliser une première assertion sur l'influence de la lumière du jour. Lorsque des espaces intérieurs sont assombrés par d'autres bâtiments (centre-ville, constructions denses), il est possible d'éta-

blir la position là où le ciel est encore visible à hauteur de table. Ce point est établi comme la position de no-sky-line. A l'avant (contre la fenêtre), la lumière du jour est suffisamment présente. A l'arrière, la lumière du jour est trop faible pour des exigences de travail courantes. Pour représenter graphiquement la pénétration de la lumière du jour dans la profondeur d'un local, la règle des 30° est utilisée. Il devient



Illustration 143: Aspects chromatiques du déroulement de la lumière du jour.

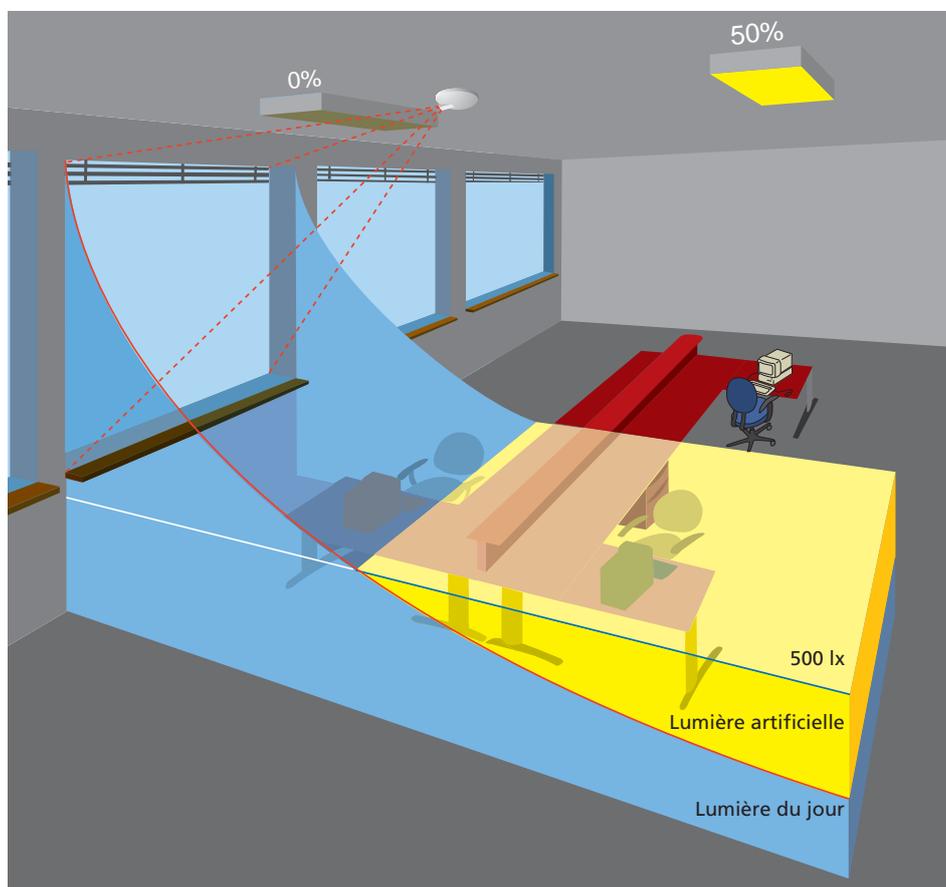
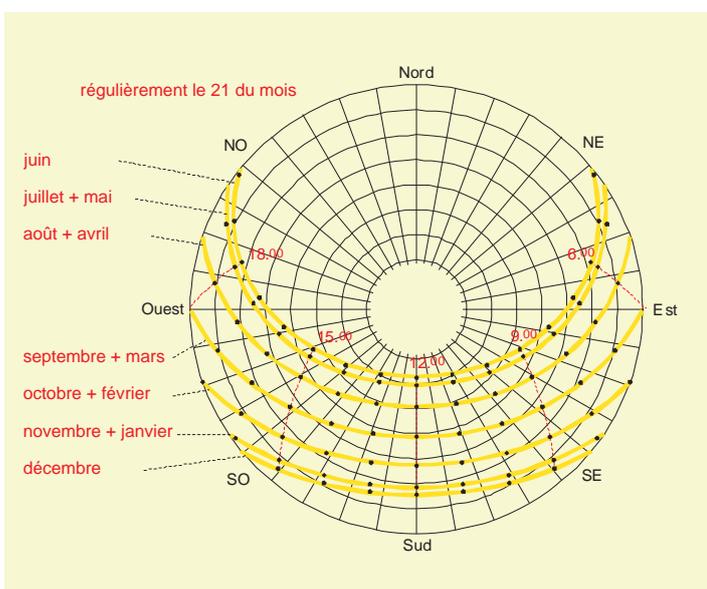
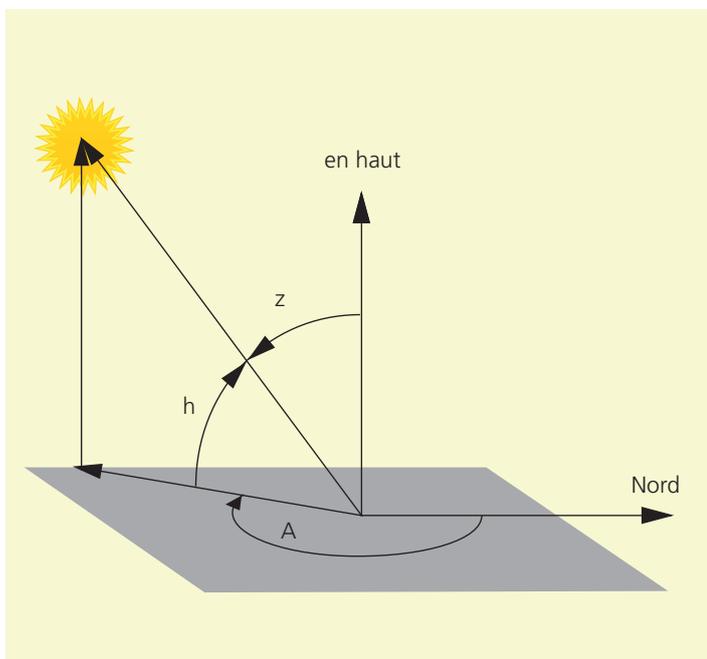


Illustration 144: Représentation schématique d'un réglage de la luminosité constante.

alors vite clair que la hauteur de l'allège ne joue pratiquement aucun rôle. Pour cela, l'exécution du linteau ou des éventuels avancements constituent une limite pour l'utilisation de la lumière du jour (Illustration 148). La règle d'or qui s'en dégage est donc: la profondeur de la lumière du jour correspond environ au double de la hauteur éclairée du sol au linteau.

Illustration 145:
Géométrie solaire avec hauteur du soleil h et azimut A (déviation nord)

Illustration 146:
Diagramme standard solaire polaire pour la latitude 51°N (Cologne, Erfurt, Dresde)



Définition de la luminosité suffisante conformément à DIN 5034-1 pour les ouvertures en façade

Dans la moitié de la profondeur de local, à 0,85 m au-dessus du sol et à 1 m de distance des deux parois latérales, le quotient de lumière du jour (D) doit être:

■ Au milieu des deux points, au moins égal à 0,9%, à l'un des deux points au moins égal à 0,75%.

■ Pour les locaux avec des fenêtres aux limites du local: 1,0%. Le facteur de réflexion des surfaces de limitation du local doit être si possible élevé.

Illustration 147:
Ligne d'occultation du ciel.

Illustration 148:
Règle des 30° .

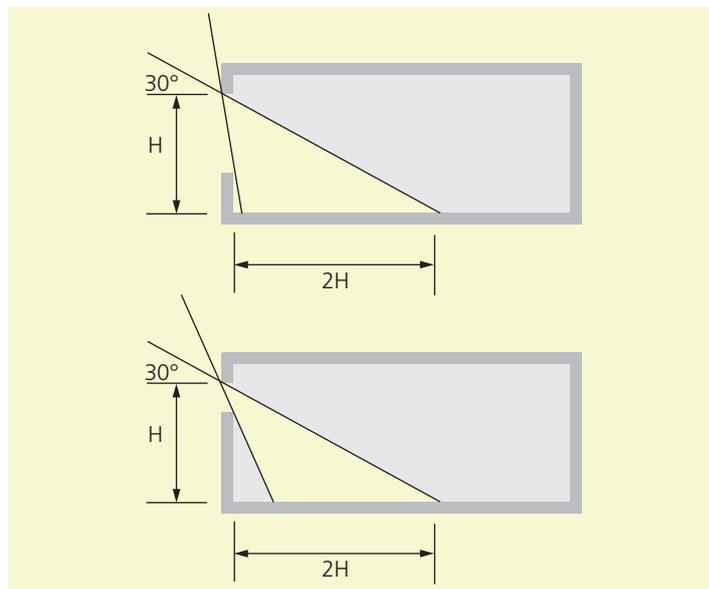
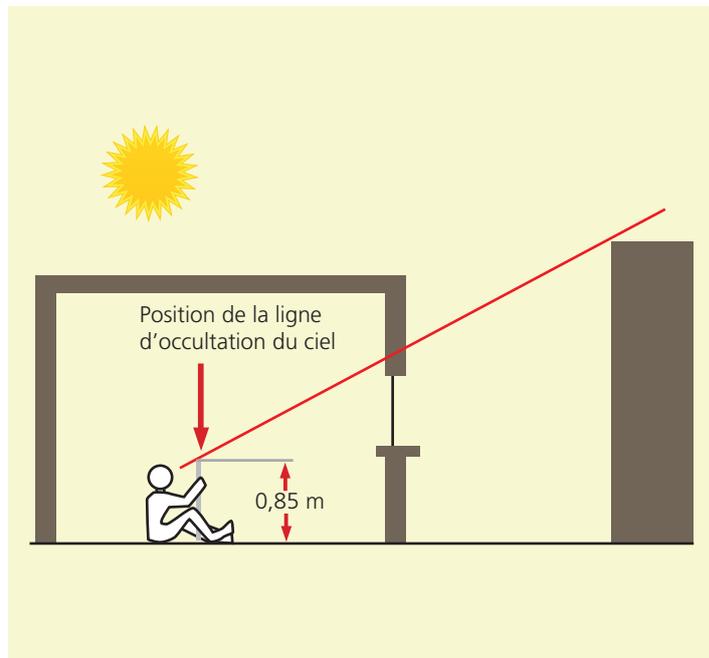


Illustration 149:
Points de référence pour la définition de la luminosité suffisante selon DIN 5034-1 pour les ouvertures latérales.

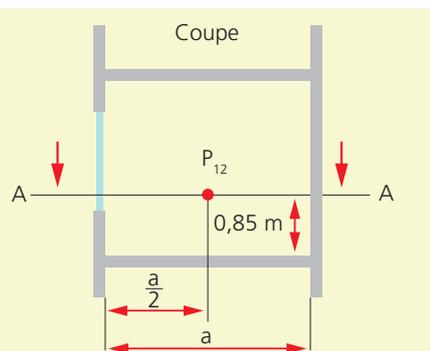


Illustration 150:
La règle des 30° doit être adaptée par des constructions et des ombres portées.

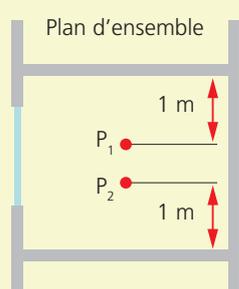
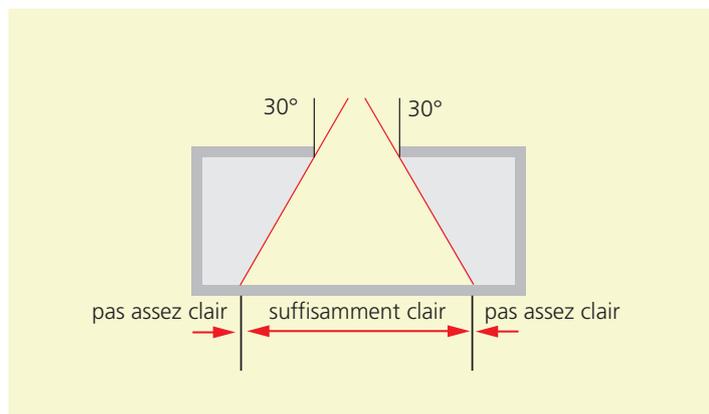
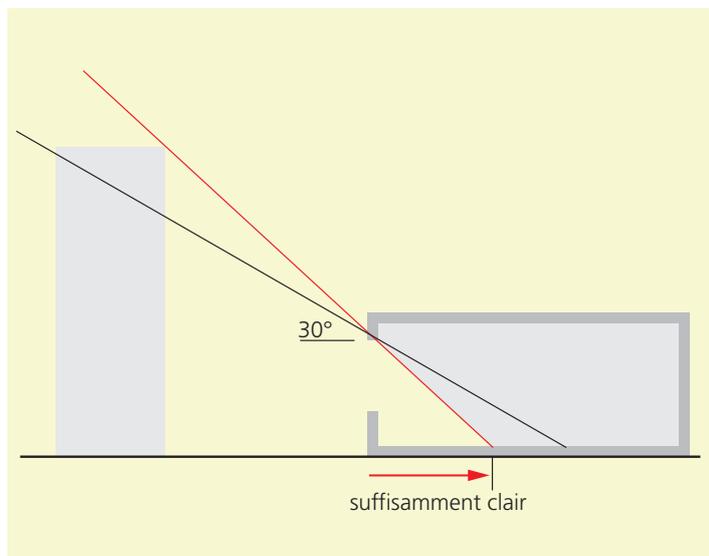


Illustration 151:
La règle des 30° de lucarne.



Le même principe peut être appliqué aux situations de lanterneaux, où l'angle de 30° ne sera pas tracé par rapport à l'axe l'horizontal mais à l'axe vertical. La disposition du plan révèle que les murs freinent le flux lumineux ou le reflètent. Les murs clairs ont alors un effet plus positif que les murs sombres. Les grandes pièces sans cloison de séparation bénéficient mieux de flux lumineux extérieur.

Définition de la luminosité suffisante conformément à DIN 5034-1 pour les lanterneaux

■ $D_m > 4 \%$, $D_{\min} > 2 \%$. Calcul (se référer à DIN 5034-3), calcul simplifié (se référer à DIN 5034-6).

■ Si possible facteur de réflexion élevé des surfaces de limitation de la pièce, surtout du sol et du plafond.

Illustration 152:
Règle des 45° dans le plan d'architecte.

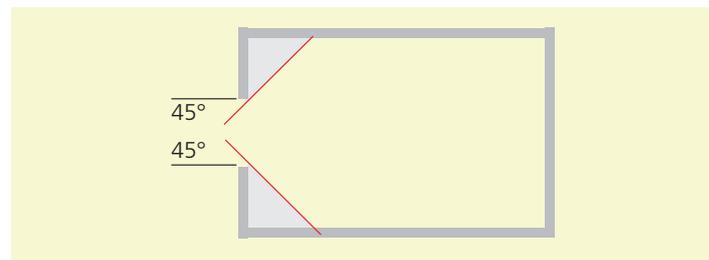
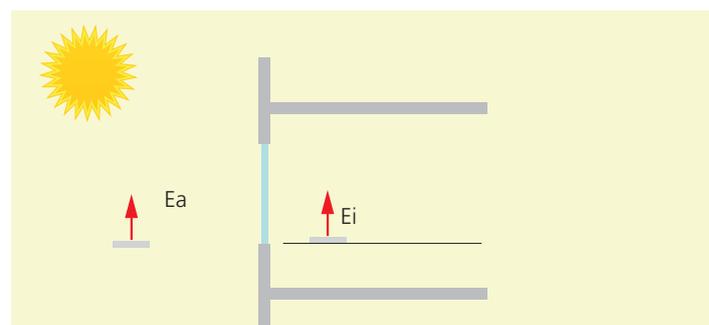


Illustration 153:
Définition du facteur de lumière du jour.



Facteur de lumière du jour D d'un point pour caractériser la part de la lumière du jour dans les pièces intérieures. Est défini comme le rapport entre l'intensité lumineuse intérieure E_i et l'intensité lumineuse extérieure E_a .

$$D = E_i/E_a \text{ in } \%$$

D est indépendant des points cardinaux, de l'heure et de la localisation géographique
 D est une fonction de la grandeur de la fenêtre, de son emplacement, des degrés de réflexion et de la construction extérieure.

Exemple: $D = 3 \%$ avec $E_i = 300 \text{ lx}$ pour $E_a = 10\,000 \text{ lx}$

7.4 Optimisation de fonctionnement dans les bâtiments existants

Pour le renouvellement d'un éclairage existant, il existe cinq possibilités:

1. Remplacer les lampes
2. Modifier les luminaires existants
3. Remplacer les luminaires
4. Installer un réglage de lumière ou optimiser les réglages déjà existants
5. 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 puissance de lampe plus faible et un rendement plus élevé (au moins 75 %) (mesure n° 12).
- Remplacer les commutations manuelles par des détecteurs de présence, combinés à des capteurs de lumière du jour (mesure n° 21).
- Comme protection solaire, installer des lames claires, réglables et situées à l'extérieur (mesure n° 25).

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.

Remplacer les lampes (Retrofit)

Mesures 1 à 5 du tableau 47. Les lampes (agents lumineux) inefficaces sont remplacées une à une par des lampes efficaces ayant le même culot. Pour les lampes dont les culots sont décrits sur l'illustration 155, cette mesure est possible.

Indications

- Pour les lampes à incandescence et halogènes graduables, il existe des lampes économiques de remplacement spéciales, mais leur qualité laisse souvent à désirer.
- Les lampes LED graduables sont disponibles. Il faut faire attention à la puissance minimale du gradateur utilisé, en général elle est de 25 watts.
- N'utiliser que des lampes économiques d'au moins 20 000 cycles de commutation avec au maximum 60 secondes de temps d'amorçage. Ces données doivent être déclarées depuis le 1er septembre 2010 sur l'emballage des lampes.
- N'utiliser que des lampes LED ayant un indice de rendu des couleurs (R_a ou IRC) d'au moins 80 et une température de couleur de 4000 kelvins maximum. Ces données doivent être déclarées depuis le 1er septembre 2010 sur l'emballage des lampes.
- Respecter impérativement les dimensions: Quelques lampes économiques ou lampes LED sont plus grandes que les lampes à incandescence ou halogènes à remplacer.

Modifier les luminaires existants

Mesures 6 à 11 du tableau 47. Toutes les lampes (à l'exception des lampes à incandescence) nécessitent un dispositif de fonctionnement qui convertit le courant alternatif de 230 V en un autre type de courant. Ces dispositifs portent des noms divers: ballast, dispositif de fonctionnement, transformateur, bloc d'alimentation, pilote, driver. Les dispositifs de fonctionnement périmés ou inadaptés doivent être remplacés.

Remplacer les luminaires

Mesures 12 à 16 du tableau 47. Si les lampes ne peuvent pas être remplacées en raison de culots ou de dispositifs de fonctionnement inadaptés et qu'une modification des luminaires existants n'est pas possible, le remplacement des luminaires est la seule réponse possible. 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 inefficients 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: 1 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 17 à 25 du tableau 47. 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, mau-

vais positionnement des capteurs, aucun ajustement des capteurs et enfin autoconsommation élevée du réglage. Les mesures montrent que des réglages simples fournissent la plupart du temps de plus grandes économies d'énergie que les systèmes complexes.



Illustration 154: Une fonction, différentes désignations, p. ex. appareil.

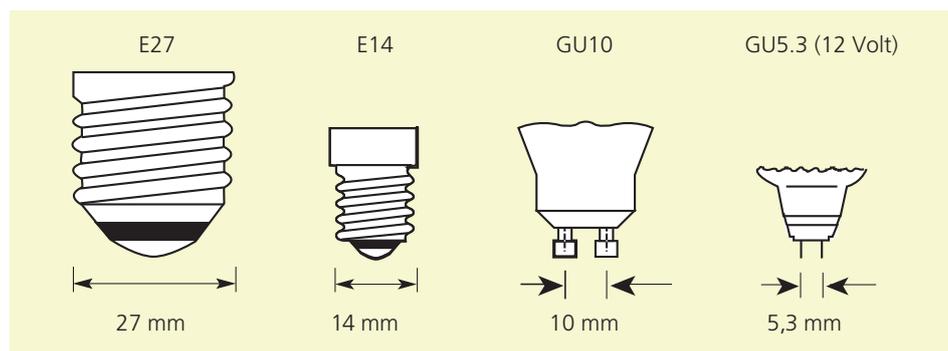


Illustration 155: Types de culot des lampes Retrofit.

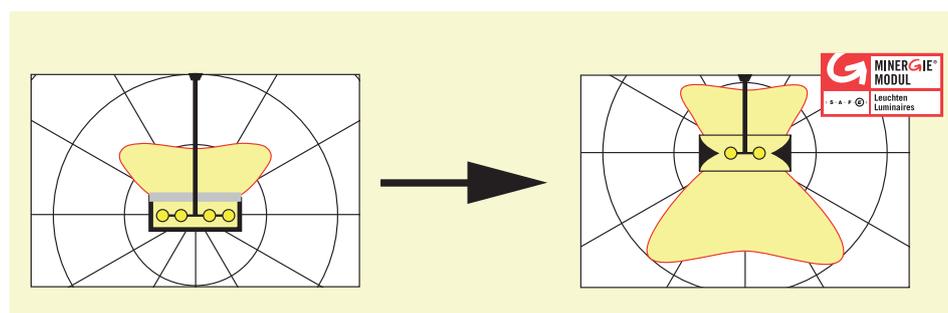


Illustration 156: Répartition de la lumière non idéale et optimale.

N°	Mesures	Utilité
1	Remplacer les lampes à incandescence classiques par des lampes économiques. Les puissances de 100 watts, 75 watts, 60 watts, 40 watts ou 25 watts sont remplacées par des lampes économiques avec env. 25% 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. 20% 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 35 watts correspondent aux LED 4 watts. Pour 50 watts, il n'existe pas d'alternative.	+++
4	Remplacer les lampes économiques dans le domaine extérieur par des lampes économiques spéciales Exterior ou des lampes LED. Les lampes économiques usuelles ne conviennent pas pour l'extérieur.	+
5	Remplacer les lampes économiques de moindre valeur par des lampes de valeur élevée et résistantes aux commutations (nombre de cycles de commutation supérieur à 100 000).	++
6	Remplacer les B. C. par des ballasts électroniques B. E. Pour les luminaires avec lampes fluorescentes, il est possible de remplacer les ballasts magnétiques conventionnels par des ballasts électroniques.	+
7	Remplacer les tubes 38 mm par des tubes 26 mm. Remplacer les tubes fluorescents (20 watts, 40 watts, 65 watts, diamètre 38 mm) par des tubes fluorescents (18 watts, 36 watts, 58 watts, diamètre 26 mm); cela permet également d'augmenter la quantité de lumière, le rendu des couleurs et de prolonger la durée de vie des lampes. Il est également recommandé d'utiliser des ballasts électroniques.	++
8	High Efficiency au lieu de High Output. Pour les tubes fluorescents de la dernière génération (diamètre 16 mm), il est possible de remplacer les tubes High-Output (80 W, 54 W, 39 W) par des tubes High-Efficiency (49 W, 35 W, 28 W), lorsqu'un éclairage lumineux d'env. 30% trop élevé est mesuré (ce qui est fréquemment le cas). Dans la plupart des cas, il faut remplacer le ballast.	++
9	Intégrer des adaptateurs T5 et un réflecteur. Les tubes avec 26 mm de diamètre et un ballast magnétique peuvent être remplacés par des tubes avec 16 mm de diamètre. Ce diamètre de 16 mm correspond à 5 pouces, d'où la désignation T5. Les tubes T5 d'env. 5 cm plus courts sont complétés par un pièce d'adaptation contenant un ballast électronique. Il faudrait en outre installer un réflecteur qui dirige la lumière vers le bas. Cette mesure n'est recommandée que pour des réglettes simples et dans des locaux avec des exigences d'éclairage basses (p. ex. dépôt).	++
10	Transformer les downlights surdimensionnés. Il arrive fréquemment que le nombre de downlights dans les zones de passage soit trop élevé. Un éclairage lumineux de 100 lux est suffisant. Par le remplacement de l'appareil, le plafonnier peut être transformé de façon intense. Un downlight à 1 lampe est préférable à un plafonnier à 2 lampes. Pour cette mesure, la solution actuellement la plus rentable est la LED (mesure 13).	++
11	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.	+++
12	Remplacer les plafonniers et les luminaires muraux 1 par 1. Remplacer un luminaire inefficace par une puissance inférieure et un rendement plus élevé (au moins 75%).	++

Tableau 47:
Augmentation de
l'efficacité des éclairages – les mesures à prendre.

N°	Mesures	Utilité
13	Intégrer des LED aux downlights. Les luminaires LED sont actuellement la meilleure option dans les couloirs. Dans de nombreux cas, il est possible de remplacer les downlights usuels par des lampes fluorescentes compactes avec la moitié de la puissance.	++
14	Remplacer les réglettes lumineuses avec tubes fluorescents par des LED. Remplacer les tubes fluorescents insérés dans le plafond (env. 30 W à 50 W par mètre) par des réglettes lumineuses à LED (10 W à 20 W par mètre).	+++
15	Renouveler les luminaires sur pied. Des luminaires sur pied plus anciens avec des lampes fluorescentes compactes avec 4 fois 66 W peuvent être remplacés par des luminaires sur pied avec 2 fois 55 W (ou 4 fois 28 W) avec env. 30% de lumière directe.	++
16	Remplacer les luminaires de bureau par des LED. Remplacer les lampes à incandescence ou halogènes par des luminaires de bureau avec LED. Les LED conviennent mieux pour cette application que les lampes économiques (env. 10 W à 15 W LED par poste de travail).	+++
17	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.	+
18	Intégrer des horloges. Il est efficace et avantageux d'étendre l'éclairage à midi ou le soir au moyen d'une minuterie.	+
19	Intégrer une minuterie. Dans les locaux avec de courtes présences, il est recommandé d'installer des minuteries (déclenchement automatique après 5 à 15 minutes).	+++
20	Installer un détecteur de présence. Il est recommandé d'installer des détecteurs de présence 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: En et Hors automatique (auto on/off).	+++
21	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: Hors automatique, En manuel (c.-à-d. que la lumière ne s'allume pas automatiquement, mais il faut presser un bouton).	++
22	Ajuster le réglage de la luminosité existante. Le niveau de luminosité est souvent incorrect ou mal réglé, ou les délais sont trop longs, et la lumière ne s'éteint pas.	++
23	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.	++
24	Réglages de la luminosité constante avec déclenchement nocturne. La consommation propre d'installations de réglage complexes est considérable; il n'est possible de réaliser d'importantes économies qu'avec un déclenchement nocturne automatique de la consommation en veille.	+
25	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.	+++

7.5 Rentabilité

Comparer plusieurs offres: Il est recommandé de comparer plusieurs offres car les différences de prix peuvent être considérables. 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 1300 francs selon le catalogue, une grande banque a payé seulement 400 francs 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 avan-

tageux, 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.

Faire attention aux coûts d'entretien: Dans le calcul de rentabilité, les dépenses, en plus ou en moins, doivent impérativement être prises en compte pour l'entretien. Un remplacement fréquent des lampes coûte non seulement de l'argent pour les nouvelles lampes mais également pour la main d'œuvre lors du remplacement. Pour les installations LED, cet aspect est particulièrement pertinent.

Exemple de calcul de rentabilité

Cet exemple part du principe qu'un éclairage de restaurant doit être remplacé pièce par pièce.

■ L'installation précédente n'a aucune valeur résiduelle et doit être remplacée de toute façon.

■ Les luminaires sont remplacés, donc installés à l'endroit-même où se trouvaient les anciens luminaires. Les coûts d'installation sont donc minimes.

	Eclairage conventionnel	Eclairage avec LED
Utilisation	Restaurant	
Surface	300 m ²	
Nombre de luminaires spots	100	
Puissance du système du luminaire	40 W	25 W
Puissance installée totale	4,00 kW	2,50 kW
Puissance installée totale	13,3 W/m ²	8,3 W/m ²
Heures de fonctionnement	3600 h/a	3600 h/a
Indice de dépense d'énergie	48,0 kWh/m ²	30,0 kWh/m ²
Consommation d'énergie	14,4 MWh/a	9,0 MWh/a
Prix moyen de l'énergie	200 Fr./MWh	200 Fr./MWh
Coûts de l'énergie sur 10 ans	28 800 Fr.	18 000 Fr.
Lampe de remplacement	40 Fr.	0
Frais de remplacement	20 Fr.	0
Nombre de remplacements sur 10 ans	7	0
Frais de maintenance sur 10 ans	42 000 Fr.	0
Prix par spot y c. installation	150.00 Fr.	350.00 Fr.
Installation	50.00 Fr.	50.00 Fr.
Investissement	20 000 Fr.	40 000 Fr.
Coûts totaux sur 10 ans	90 800 Fr.	58 000 Fr.
Durée d'amortissement LED		3,8 ans

Tableau 48:
Calcul de rendement simple pour l'éclairage d'un restaurant.

■ La comparaison montre la rentabilité entre une nouvelle solution conventionnelle et une variante LED avec économies d'énergie et de coûts d'exploitation.

7.6 Potentiel d'économies avec l'éclairage des bâtiments industriels

D'après les statistiques de la branche, la consommation d'électricité des éclairages dans les bâtiments industriels a été constamment en légère augmentation jusqu'à aujourd'hui, avec une moyenne annuelle d'environ 0,5 %. A ce jour, aucune mesure avérée n'a été prise pour réduire la consommation d'électricité pour l'éclairage dans ce secteur. Ce qui serait possible avec une série de mesures:

■ **EtiquetteEnergie pour les luminaires:** Comme pour les lampes, une répartition par classe d'efficacité pourrait être créée pour l'efficacité lumineuse des luminaires. Le modèle pourrait s'orienter vers la grille d'évaluation des luminaires Minergie. Avec un démantèlement progressif des luminaires inefficients, l'efficacité lumineuse moyenne des luminaires pourrait être augmentée pour passer de 40 lm/W environ actuellement à 60 lm/W.

■ **Optimisation de la conception:** La norme SIA 380/4 «Energie électrique dans les bâtiments», est un outil de conception des installations d'éclairage (et d'autres

consommateurs électriques) efficaces sur le plan énergétique. La norme devrait être appliquée sur tout le territoire suisse. Pour une mise en œuvre réussie, une assurance qualité systématique est obligatoire dans la conception et l'exécution. Jusqu'ici, les expériences avec l'éclairage Minergie montrent d'importantes lacunes dans la mise en œuvre.

■ **Technologie LED:** Il faudra dix ans pour que la phase de développement des LED s'achève et que les LED soient utilisées comme technologie standard. Les LED favoriseront la prise de mesures si l'assurance qualité est garantie.

Avec ces mesures, une économie d'environ 3000 GWh par an est techniquement possible dans le domaine des bâtiments industriels (Illustration 157). Comme la durée type de remplacement des installations d'éclairage est d'environ 15 ans, la même durée est nécessaire entre l'introduction d'une exigence et la mise en œuvre complète des mesures.

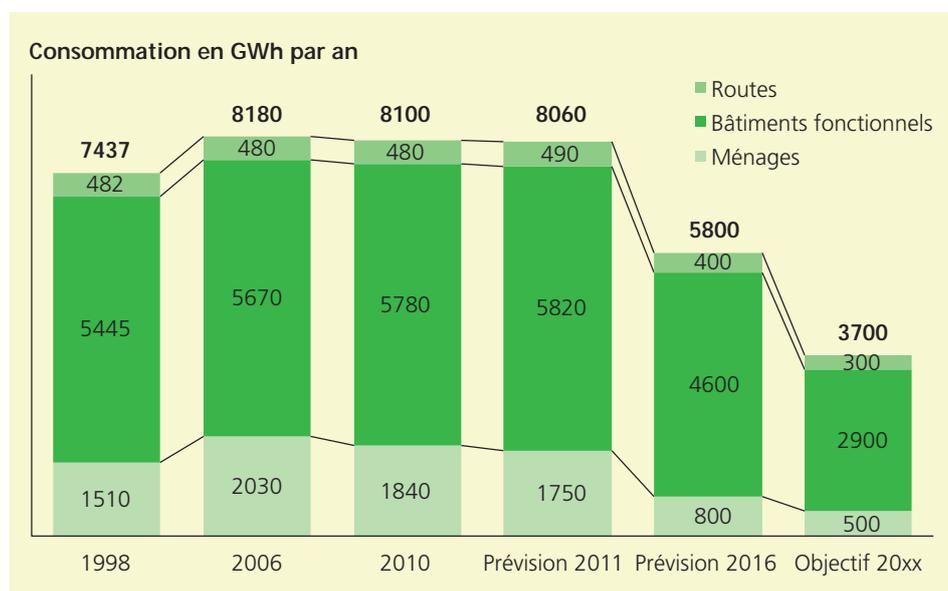


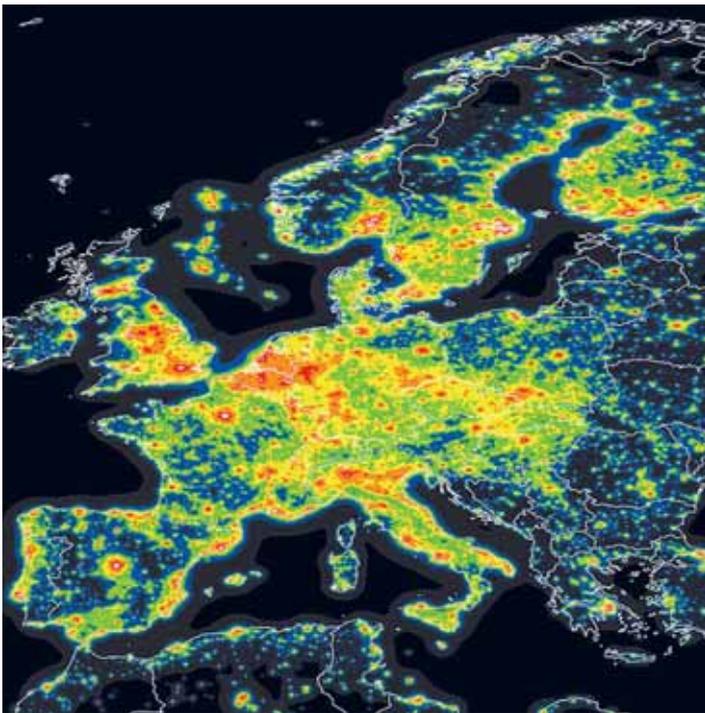
Illustration 157: Potentiel d'économie sur l'éclairage professionnel en Suisse.

7.7 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

Illustration 158: Pollution lumineuse sur l'Europe.

Illustration 159: L'obscurité devient un bien de luxe, également chez nous.



L'obscurité devient un bien de luxe.

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.

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 translucides, 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. Le luminaire à grille régulier s'étend sur toutes les zones, mais l'intensité du raster est réduite 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 bâtiment. Et, comme posée sur un nuage

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 160:
Le bâtiment scolaire
Leutschenbach avec
étage sur fondations,
trois étages
avec salles de classe,
étage avec bibliothèque
et médiation ainsi qu'une
salle de gymnastique.*

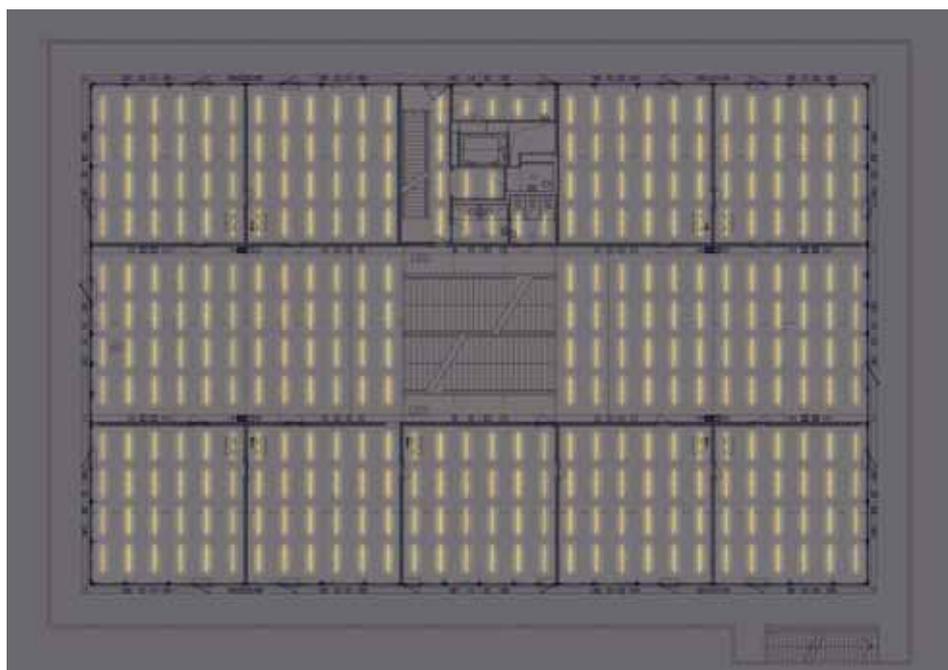


de lumière diffus, l'école semble flotter. Dans le crépuscule, elle éclaire telle une gigantesque lanterne au-dessus du nouveau quartier de Leutschenbach. L'union de la complexité de la structure avec l'éclairage ne pouvait pas être intentionnelle. L'augmentation des hauteurs d'étage en revanche, cette dissolution de la pression au rez-de-chaussée vers le haut, la tentative de montrer cette évidence 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 allure cristalline et uniforme au bâtiment



*Illustration 161:
Coupe à travers le
bâtiment scolaire
Leutschenbach.*



*Illustration 162:
Plan d'ensemble 1^{er}
étage, bâtiment
scolaire Leutschen-
bach, avec les posi-
tions des lumi-
naires.*

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 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 noyaux de l'escalier et le sous-sol (avec salles de travail et zones techniques), il n'y

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 Fr.
------------------------------	-------------

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 163:
Rez-de-chaussée.*



*Illustration 164:
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 lu-

minaires. 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'apesanteur, les ner-

Objet

Extension de la construction
Centre des congrès
Davos
7270 Davos Platz

Maître d'ouvrage

Landschaft Davos
Gemeinde

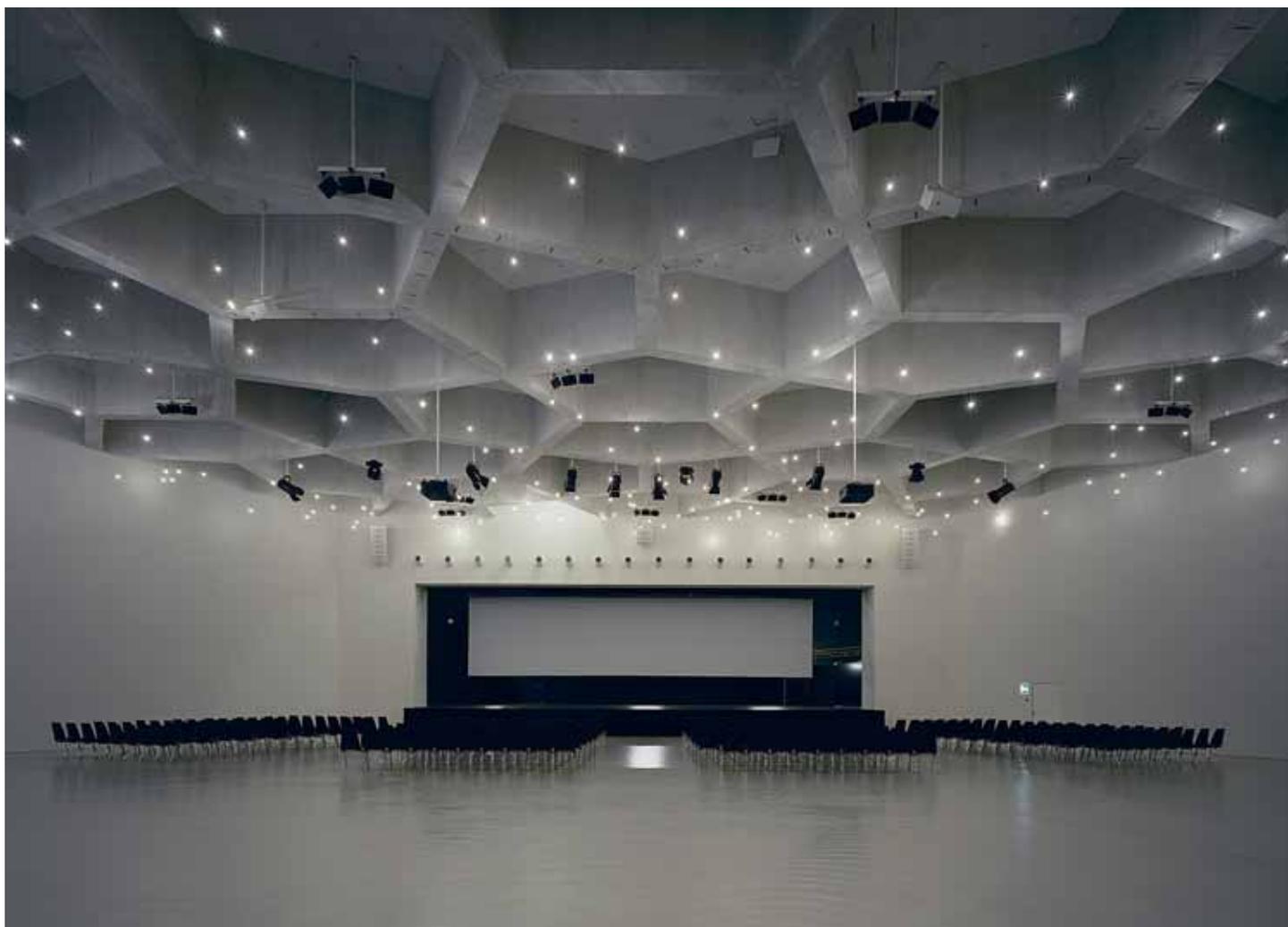
Architecte

Degelo Architekten
4052 Bâle

Concepteur d'éclairage

Amstein + Walthert
8050 Zurich

*Illustration 165:
La nouvelle salle
plénière du Centre
des congrès de
Davos.*



vures 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 du trou » 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 éclairagements 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

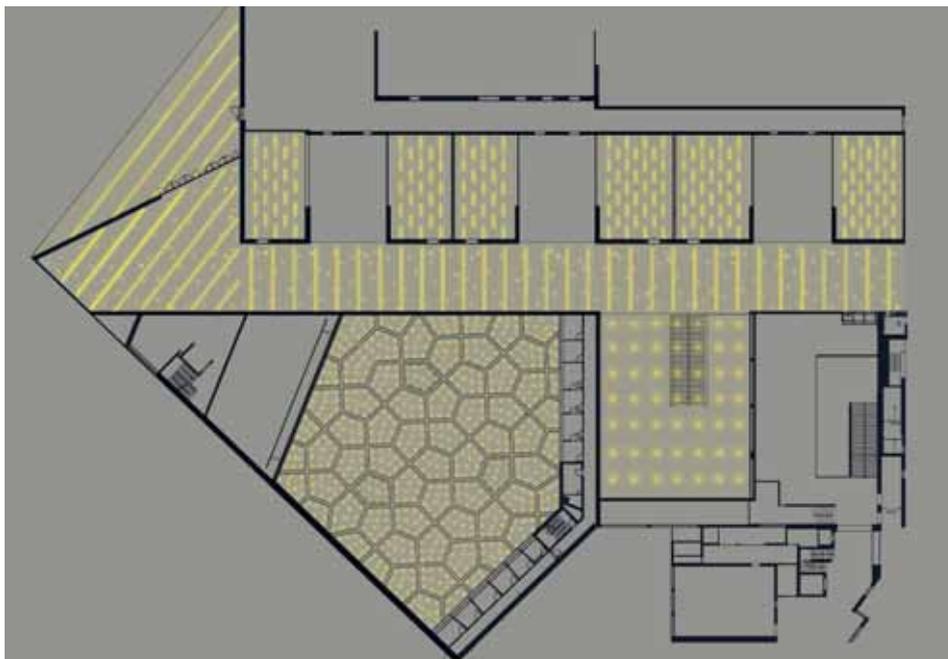
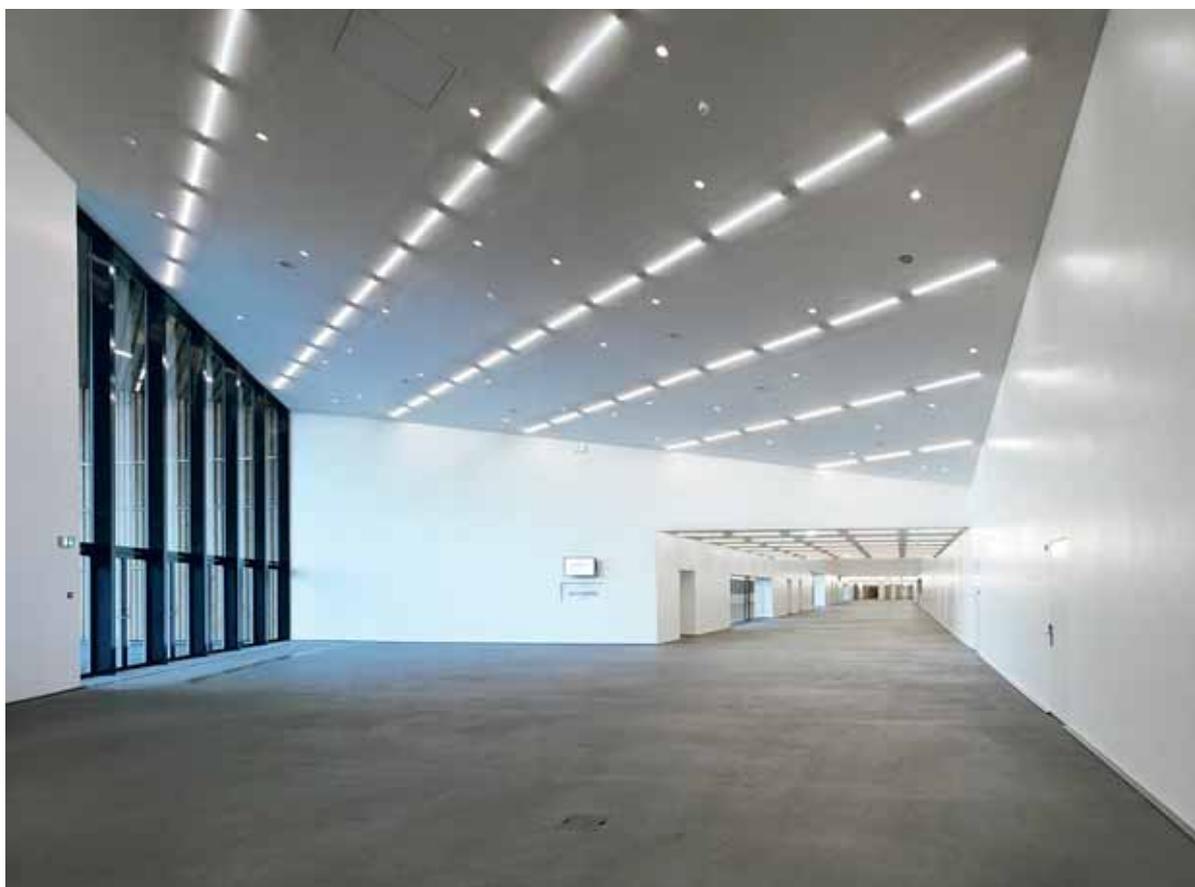


Illustration 166:
Plan d'étage au niveau du parc.



*Illustration 167:
Nouvel accès au
Centre des congrès
Davos.*



*Illustration 168:
Hall d'entrée avec
vue sur la salle des
pas perdus du
Centre des congrès
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 moyen	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 Fr.
Achèvement	2010

8.3 Technorama de Winterthour

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.

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 présentation de la technologie est une thématique qui correspond à l'objectif du Technorama. C'est également une tentative de

Objet

Nouvel aménagement entrée et restaurant, Technorama, Winterthour

Maître d'ouvrage

Stiftung Technorama, Winterthour

Architectes, direction des travaux

Dürig & Rami AG
8004 Zurich

Concepteur d'éclairage

Amstein + Walthert
8050 Zurich

*Illustration 169:
Effet lumineux de la
lampe fluorescente
intégrée dans la
couche intermédiaire
vers l'intérieur
et vers l'extérieur.*



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 architecturales. Le marché a été remporté par Dürig & Rami 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 magasin, 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 époxy coloré en rouge, constitue à la fois un plaisant signe de bienvenue pour les visiteurs et une excellente caractéristique

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

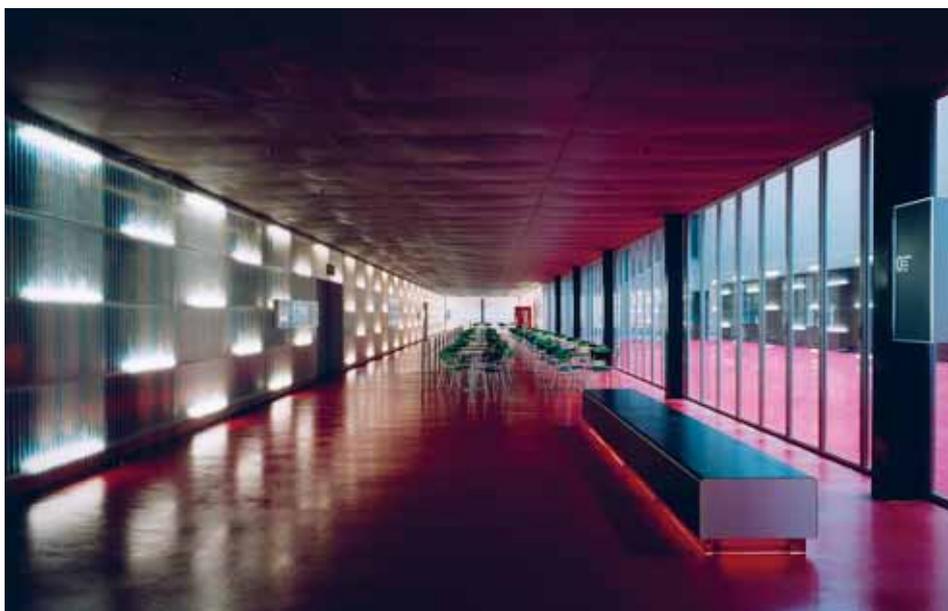
CFC 23 installations électriques	626 232 Fr.
----------------------------------	-------------

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 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.

L'espace rouge du foyer relie les deux cages d'escalier existantes à un système de



*Illustration 170:
Nouveau couloir
central de distribu-
tion dans le Techno-
rama.*



*Illustration 171:
Caisse supplémen-
taire dans le hall
d'entrée.*

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.

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 ludo-phénoménologique 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 Centre psychiatrique d'Appenzell

Une tradition interprétée

Ce concept lumière poursuit l'objectif de produire une ambiance confortable avec des moyens simples. Le développement des luminaires spéciaux a été effectué dans le même champ de contraintes, compris entre tradition et adaptation moderne, que celui de l'aménagement intérieur. Ainsi, les plafonniers en verre dépoli et en métal thermolaqué ont contribué pour une part à l'effet spatial traditionnel. La mise en forme réduite leur attribue cependant un souffle de modernité classique. En raison du rendement élevé des luminaires, ils satisfont par ailleurs aux critères des standards Minergie. Par une mince jointure, une délicate couronne solaire se pro-

file sur le plafond, donnant une certaine légèreté au luminaire et le faisant pour ainsi dire flotter sous le plafond. Cette jointure sert en même temps à contrôler l'état thermique de la lampe et du ballast. La forme de base des plafonniers se retrouve également dans les luminaires suspendus dans les zones avec un plafond élevé et dans la zone d'entrée à deux niveaux. Dans les aires de détente, elle apparaît dans une composition de lustres à quatre bras (en forme de feuille de trèfle). Les mesures d'éclairage dans les autres locaux comme les bureaux, les chambres des patients et les salles de bain se distinguent également par une mise en forme simple de l'aménagement intérieur comme un langage clair. L'objectif, qui était de créer une sécurité et un confort chaleureux qui ne rappellerait en rien celui d'un hôpital

Objet

Centre psychiatrique d'Appenzell
9100 Herisau/AR

Maître d'ouvrage

Canton d'Appenzell-Rhodes ext.

Architectes

Harder Spreyermann Architekten
ETH/SIA/BSA AG
8004 Zurich

Concepteur d'éclairage

Amstein + Walthert,
8050 Zurich

*Illustration 172:
Nouveau couloir
dans le Centre psy-
chiatric d'Appen-
zell avec luminaire
suspendu de
conception spéciale.*



mais plus une atmosphère lumineuse qui favorise un processus de guérison rapide, a donc pu être clairement atteint.

Le confort avec une simplicité absolue

L'asile psychiatrique du canton d'Appenzell-Rhodes Extérieures, à Herisau, achevé en 1908 par le bureau d'architectes Rittmeyer & Furrer, est l'un des plus connus de ce genre en Suisse, tant en raison de son installation que de son architecture innovantes pour l'époque. L'installation a été construite sur le modèle britannique et allemand dans la philosophie du système «non restreint», le traitement sans contrainte. A ce principe, qui accordait le plus de liberté possible aux malades et qui employait un personnel de garde en lieu et place de murs et de grilles, correspondait une composition architecturale de différents pavillons indépendants dans un vaste jardin. Les bâtiments sont caractérisés par l'empreinte du Heimatstil suisse et par son intégration dans le paysage. En tant que mouvement architectural contraire à l'historicisme et à l'Art nouveau, le style suisse se voulait à la fois moderne, respectueux des normes d'hygiène et traditionaliste. La lumière, l'air et le soleil, prémisses de la modernité, caractérisaient également les bâtiments de Heimatstil suisse. Ainsi, à Herisau, l'accent a été mis sur de bonnes installations sanitaires, l'alimentation électrique et en eau potable et une orientation de tous les bâtiments vers le sud, vers la lumière. Parallèlement, ils devaient donner une impression accueillante, non celle d'un hôpital, ne pas trop s'éloigner du type de construction locale, pour ainsi dire avoir un caractère de type villa afin que les

malades s'y sentent autant que possible bien et chez eux. Le réaménagement en profondeur du bâtiment plus de cent ans plus tard s'est appuyé sur les mêmes principes. Le maintien maximum du bâtiment existant et le renforcement de l'image intégrale de l'installation constituaient le but principal des architectes Harder Spreyermann de Zurich. En même temps, ils devaient adapter le bâtiment historique aux exigences de fonctionnement de la psychiatrie actuelle et aux standards modernes de techniques du bâtiment et énergétiques. Dans une logique d'amélioration de la construction, ils ont, avec des aménagements en profondeur et une nouvelle annexe, transformé la bâtisse en un tout nouvel établissement.

Grâce à un nouveau noyau central, plus spacieux, il a été possible d'y intégrer un monte-lits, des zones de circulation et des locaux de service nécessaires, y compris le raccordement à un tunnel de liaison entre les différentes parties du complexe. Dans l'espace intérieur, cette aile crée une nouvelle entrée éminente avec un hall sur deux niveaux. Le large couloir existant et les parvis des cages d'escalier historiques forment avec la nouvelle zone de parvis de l'ascenseur une structure de pièce généreuse. La séparation volumétrique caractéristique du bâtiment sur la façade nord crée en cela un bon éclairage naturel et des perspectives attrayantes. Les couloirs deviennent ainsi des lieux de déplacement, de rencontre et de communication pour les patients.

L'adaptation des chambres de patients aux standards actuels faisait partie du programme d'aménagement comme une exigence importante. 14 chambres individuelles et 13 chambres à deux lits ont été créées, avec des fenêtres hautes orientées vers le paysage. Les aires de détente profitent de la qualité spatiale de l'ancien bâtiment historique. Les grandes salles sont orientées vers un panorama unique avec des fenêtres saillantes en renflement et révèlent la modernité de la construction d'époque avec des poutres de béton centenaires. L'agrandissement intérieur est de conception entièrement nouvelle au re-

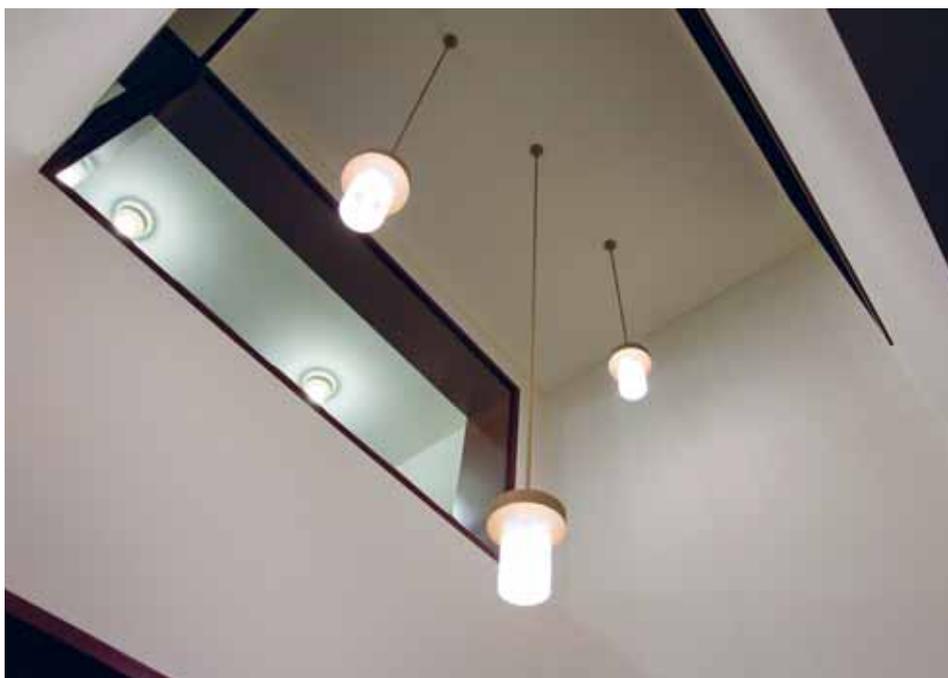
Caractéristiques de l'éclairage

L'éclairage a été planifié sur la base des directives VDI 6008 et de SN EN 12464-1 avec un facteur de maintenance de 0,8.

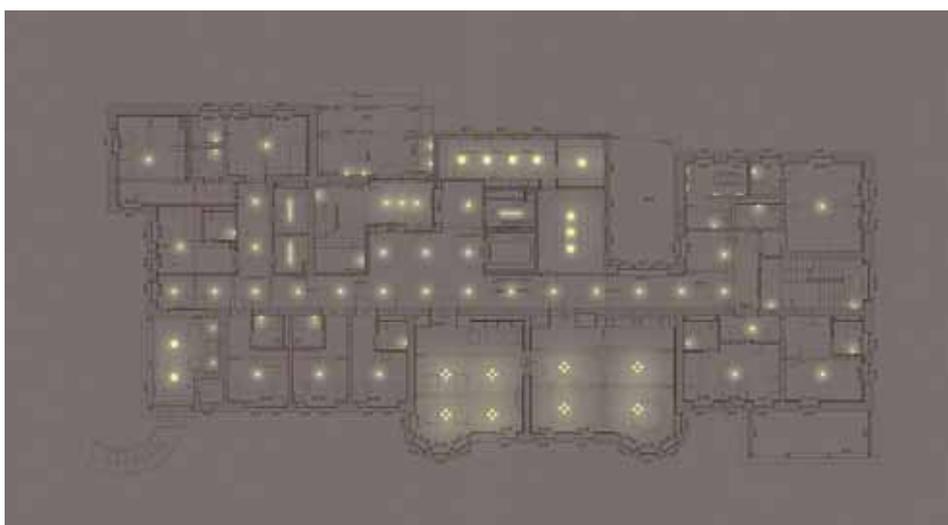
Surface éclairée	2010 m ²
Besoin d'énergie pour l'éclairage	32,7 MWh/a
Valeur du projet éclairage	16,3 kWh/m ²
Achèvement, certification Minergie	2010

Caractéristiques des coûts

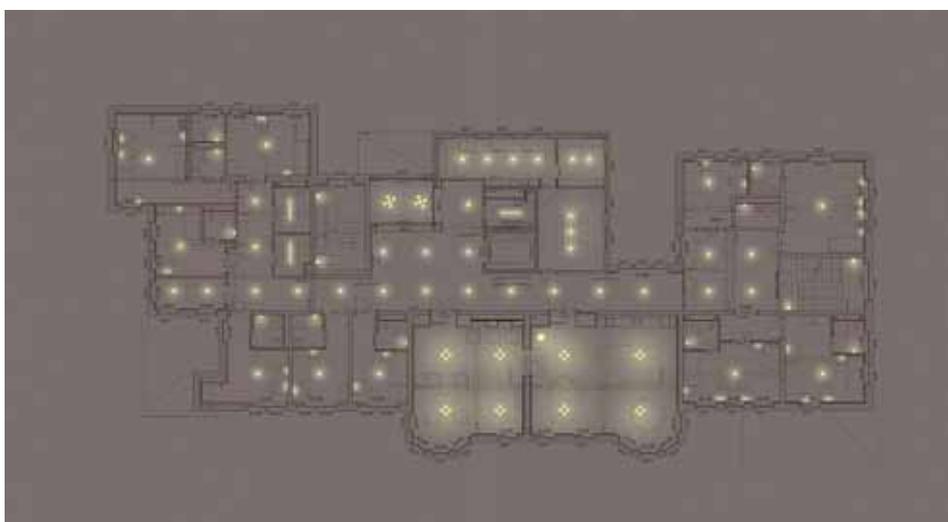
CFC 233 luminaires et lampes	168 000 Fr.
------------------------------	-------------



*Illustration 173:
Vue vers le haut
dans la zone d'en-
trée à deux étages.*



*Illustration 174:
Plan du rez-de-
chaussée.*



*Illustration 175:
Plan du 2^e étage.*

gard des exigences actuelles en matière d'acoustique et de protection incendie. Les qualités de l'existant historique constituaient cependant la référence pour la nouvelle interprétation architecturale intérieure. Des châssis solides de porte et de fenêtre, des plinthes imposantes et des revêtements muraux de type lambris avec armoires et étagères intégrées créent un

intérieur global, à l'aspect traditionnel. Le linoléum utilisé pour le revêtement du sol prolonge la tradition historique de ce matériau. L'ouvrage en bois peint en rouge-brun crée, avec le plancher en linoléum dans des tons chauds rouge, brun et vert, un confort qui n'est pas sans rappeler l'intérieur original.



Illustration 176:
Accès à la zone du
couloir.



Illustration 177:
Aire de détente.

8.5 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 tant une répartition qu'un éclairage lu-

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 + Walther
8050 Zurich

Illustration 178: Vue de la bibliothèque cantonale au crépuscule.



mineux 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 éclairaient 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 179: 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 livraison des luminaires et des lampes	340 000 Fr.
------------------------------------------------	-------------

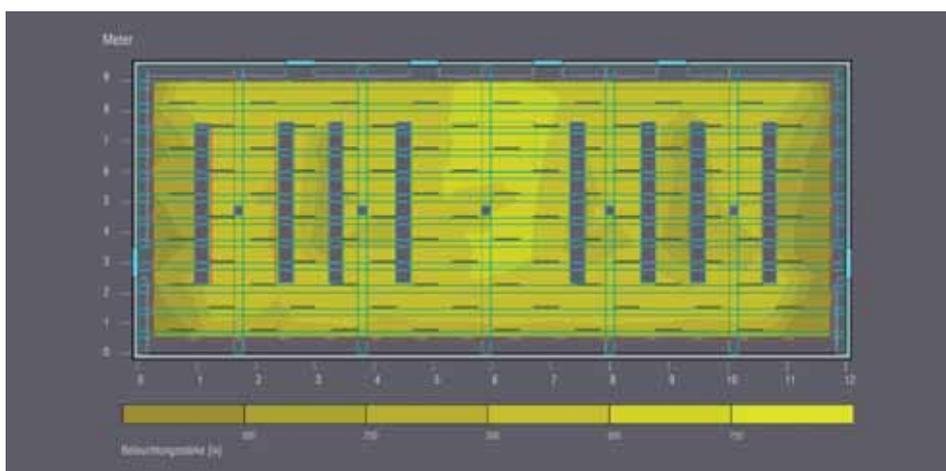


Illustration 180:
Répartition de
l'éclairage lumi-
neux (bibliothèque
cantonale, Liège).



Illustration 181:
Cafeteria dans la bi-
bliothèque canton-
nale de Liège.



Illustration 182:
Service de prêt de la
bibliothèque canton-
nale de Liège.

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.

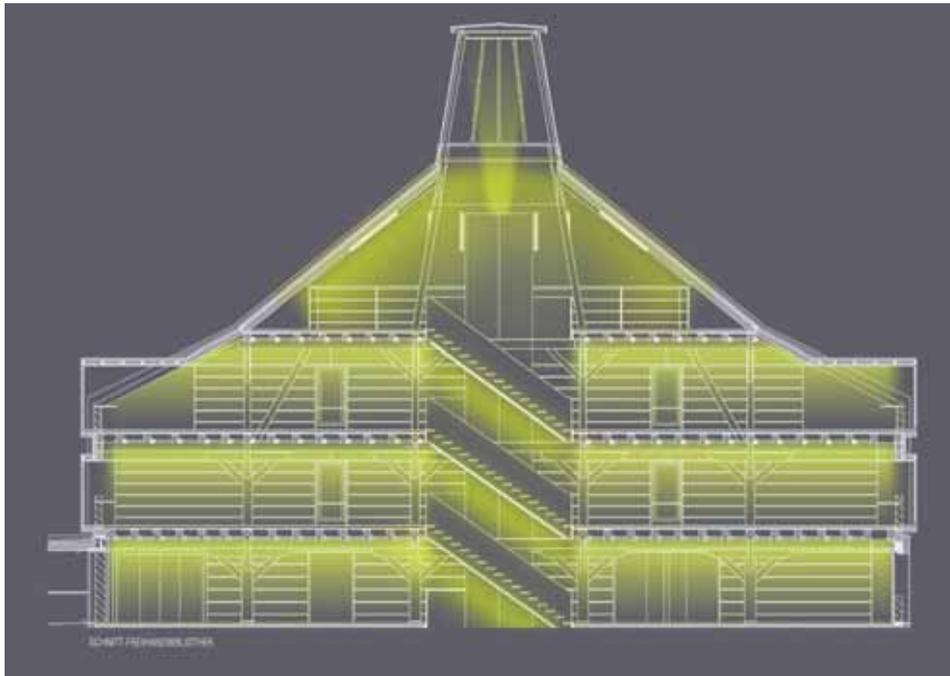


Illustration 183:
Coupe.

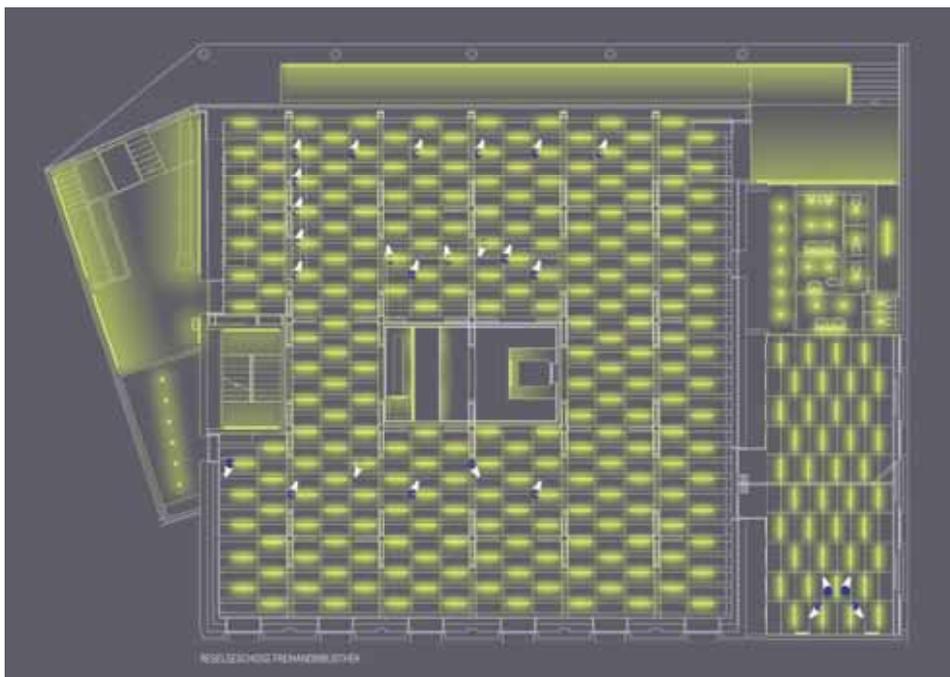


Illustration 184:
Plan du rez-de-
chaussée.

8.6 Hôpital municipal de Triemli

Le phare de la ville de Zurich

Selon l'un des objectifs de la législature zurichoise d'appliquer le modèle «société à 2000 watts», l'hôpital de Triemli doit devenir une référence pour les bâtiments hospitaliers efficaces sur le plan de l'énergie. Afin que cet objectif ambitieux soit atteint, la consommation d'énergie dans la section «Eclairage» doit se situer nettement en dessous des exigences Minergie. Tandis que l'outil de calcul pour les éclairages Minergie a fait ses preuves pour les bâtiments scolaires et de bureaux (il existe d'excellentes références), il ne s'agit pour les hôpitaux, les maisons de retraite et de soins, que de premiers essais et estimations, avec très peu de cas expérimentés.

Pour atteindre l'objectif de l'hôpital à 2000 watts, la nécessité d'agir est grande, selon les concepteurs d'éclairage du Triemli.

Pour eux, l'utilisation de la lumière est centrale. Quel niveau d'éclairage est nécessaire et à quel endroit? Comment le flux lumineux arrive-t-il jusque-là le plus efficacement possible? A ce sujet, les concepteurs d'éclairage observent le principe selon lequel la lumière fait partie de la tâche visuelle et que son effet dans l'espace ne doit pas être négligé.

Concept d'éclairage

Le concept «Lumière pour tâche visuelle» est devenu une réalité depuis longtemps dans différentes zones de l'hôpital. Ainsi, les zones d'une salle d'opération par exemple ne sont pas toutes éclairées avec 10000 lux, utiles au site d'intervention chirurgicale. L'ensemble d'une salle d'opération est naturellement un local avec un éclairage lumineux élevé, mais les sources lumineuses peuvent être en partie mobiles. Comme dans cet exemple, une source de lumière universelle en partie mo-

*Illustration 185:
L'hôpital à 2000
watts Triemli à Zu-
rich.*



bile était dans les conversations au départ dans le processus de conception du Triemli. Elle devait être transportée par le personnel et fournir la lumière pour les tâches visuelles. Malheureusement, le concept ne réunissait pas les exigences d'hygiène et de disponibilité.

Méthode descendante dans tous les secteurs

Que ce soient les couloirs, les chambres des patients ou les salles de traitement, dans chaque type de local (catégorie d'éclairage) il a fallu mener une série d'expériences virtuelles. L'exemple «Eclairage des chambres dans le bloc hospitalier» doit illustrer de manière exemplaire l'atelier de lumière dans le «Cas Triemli». Pour les chambres des patients, trois possibilités d'éclairage ont été sélectionnées et évaluées avec un outil de calcul: luminaires muraux, qui répartissaient la lumière indirectement sur le plafond, plafonniers centraux et luminaires à suspension centraux. Les calculs ont été faits avec des types de luminaires théoriques presque jusqu'à l'achèvement des travaux. Le luminaire concret a dû être choisi volontairement tout à la fin du processus de conception. Ce qui est alors décisif est la fonction du local, et non pas le design du luminaire. Cette approche descendante a été appliquée dans tous les secteurs. Car malgré l'abondance des types de locaux, des niveaux et des fonctions, la valeur cible globale des normes SIA devait au moins être

atteinte à la fin du processus. Afin que le concept énergétique fonctionne, il a fallu viser un total de valeur plus faibles que la norme. Pour le calcul de la consommation d'énergie des chambres, la valeur cible SIA corrigée est de 22,4 kWh/m² contre 27,2 kWh/m² pour la valeur Minergie. La valeur corrigée du projet est de 19,6 kWh/m². Un bon résultat qui ne doit pas pousser à l'euphorie cependant. En effet, des incertitudes perdurent comme par exemple la disposition précise des protections solaires ou l'atmosphère souhaitée pour l'espace entre la planification de l'éclairage et l'éclairage futur dans l'hôpital à 2000 watts. Les consommateurs du processus comme les luminaires de lecture ou les luminaires d'examen également ne sont pas encore inclus dans la valeur du projet; pourtant ils doivent être pris en compte.

Le défi de l'hétérogénéité

Pour les types de locaux spacieux comme les chambres et les couloirs, l'optimisation énergétique est centrale. Des économies minimales peuvent être décisives pour la satisfaction des prescriptions. Les couleurs murales qui réfléchissent mal ou d'autres «défauts d'éclairage» peuvent difficilement être compensés. La sécurité de conception requise ne peut être atteinte que si l'éclairage de tous les types de locaux est optimal. Cela vaut également pour les locaux spéciaux et les salles de soins. Les locaux avec des exigences d'éclairage hétérogène posent problème. Dans la chambre des patients, la fonction «Traitement» requiert 300 lux et la fonction «Nettoyage» 100 lux. La valeur pour le nettoyage vaut également à hauteur du sol et dans les coins. Mais avec des luminaires excentrés, 100 lux ne peuvent être que difficilement généralisés. Point intéressant, le plafonnier central connu dans les années 1960 s'est avéré dans les essais comme la variante la plus efficiente. Le concept apparemment peu attirant doit être repensé et re-interprété. Ce n'est pas seulement parce qu'une variante semble peu attirante à première vue qu'elle doit être victime de la censure des concepteurs d'éclairage. Les souhaits esthétiques arri-

Fiche signalétique

Type de bâtiment	Hôpital
Construction neuve ou assainissement	Construction neuve
Surface	32 000 m ²
Site	Ville de Zurich
Maître d'ouvrage	Ville de Zurich, Office des constructions
Architecte	Aeschlimann Prêtre Hasler AG
Concepteur d'éclairage	Amstein + Walthert AG
Exigence valeur limite SIA	41,6 kWh/m ²
Exigence valeur cible SIA	22,4 kWh/m ²
Exigence standard Minergie	27,2 kWh/m ²
Valeur du projet éclairage	19,6 kWh/m ²
Nombre de luminaires	env. 9000

vent en quatrième place du côté du mandant, derrière la fonction, l'efficacité énergétique et le coût. A ce stade, il est indispensable de considérer qu'il ne s'agit pas de créer des espaces fonctionnels uniquement, mais des locaux pour des personnes (malades). S'il s'agit de l'éclairage des locaux hospitaliers, en plus de la norme d'éclairage générale SIA 380/4, la norme SN EN 12464-1 doit être également satisfaite. Elle indique quel doit être le niveau de l'éclairement lumineux pour les valeurs d'éblouissement fixées. Dans les couloirs, en plus des 200 lux, des rapports lumineux différents de ceux des chambres sont re-

quis. Dans des exemples isolés en dehors de Zurich, cette norme a pu être contournée ponctuellement. Après l'assainissement, les couloirs qui étaient jusque-là éclairés avec 70 lux sont devenus suffisamment clairs dès 100 lux. Grâce au «jeu» savant avec la lumière et au comportement de réflexion prévu pour les murs, le couloir apparaît nettement plus lumineux que les 100 lux mesurés ne le laissent supposer: c'est une solution efficace.

Bons multiplicateurs

Pour l'hôpital Triemli à 2000 watts, l'objectif pour les valeurs de projet à atteindre se



*Illustration 186:
Couloir.*



*Illustration 187:
Chambre des patients.*

situait 25 % en dessous des valeurs d'éclairage Minergie. Sa valeur en kWh/m² dépend du type de locaux. Pour obtenir l'éclairage lumineux requis, le projet se base sur des luminaires non gradués, exploités de manière optimale. Les luminaires gradués nécessitent plus d'énergie que les luminaires non gradués. Ils ne sont pas gradués de manière optimale. Une constante pour les éclairages efficaces en énergie est d'éviter la consommation due au mode veille. Rien que le préchauffage «dévore» de l'énergie 24h/24h. Même si les pertes de gradation et de préchauffage sont plutôt faibles, la multiplication rend l'effet d'économies intéressant. Pour expliciter l'effet multiplicateur: si un ballast sur deux est supprimé dans les couloirs, une puissance de veille de 0,35 watt sera par conséquent supprimée pour un luminaire sur deux. Cela semble modeste, mais pour 800 ballasts économisés, l'économie annuelle de 2,5 MWh apparaît déjà plus lucrative. De nouveaux ballasts en tandem peuvent être utilisés pour deux luminaires. Avec 0,35 watt, leur consommation propre est beaucoup plus faible que celle des modèles précédents (2 watts). Moins de ballasts produit moins de chaleur également. Moins d'énergie est donc nécessaire pour la ventilation du bâtiment. Avec les dispositifs en tandem, la consommation en mode veille est de 100 watts pour les couloirs par étage du bloc hospitalier. Ce ne sont pas moins de 600 watts qui seraient au compteur d'une planification d'éclairage traditionnelle. Chaque watt économisé rapproche l'équipe de l'objectif de l'hôpital à 2000 watts!

Spécificités de ce bâtiment

- Application précise des normes et des tâches visuelles. Infractions aux normes justifiées en faveur d'une consommation énergétique moindre dans le respect de l'ergonomie.
- De l'éclairage diffus sur de grandes surfaces jusqu'à l'éclairage de la zone de travail et de la tâche visuelle.
- Réduction du mode veille et regroupement des ballasts en cas d'exploitation de plusieurs lampes.

- Intégration optimale de la lumière du jour et du rapport avec l'extérieur.

- Utilisation de luminaires portant le label Minergie.

- Séparation de l'éclairage de processus et de base.

- Tout est remis en question: rendement des luminaires, ballasts, choix des lampes, concept d'utilisation des matériaux, commande et concept de commande, utilisation, confort et comportement de l'utilisateur.

- Une conception standard empêche d'atteindre les objectifs.

8.7 Le théâtre de Zurich

Dans le foyer du théâtre de Zurich est installé un luminaire spécial en céramique chauffée qui répand sa chaude lumière de vapeur métallique en un rayonnement faible et à l'éclairage diffus à la fois. Le luminaire technico-décoratif doit répondre aux attentes énergétiques et de conception également. Au moyen d'échantillons, le concept choisi a pu être approuvé et le respect des prescriptions vérifié. L'éclairage original des façades a été développé à partir de l'idée des auteurs de cet ouvrage de la mise en scène de l'architecture. L'effet, d'accentuer les occasions spéciales avec une couleur supplémentaire, a été

bien accueilli également et aligné sur le code de signalisation. La décision d'exécuter l'ensemble de l'éclairage extérieur avec des LED était bonne, toutefois pas pour les délais imposés par le maître d'ouvrage. La courte durée d'exécution a conduit à des erreurs et à des produits qui ne correspondaient pas aux attentes de qualité. Pour cette raison, les illustrations témoignent d'un éclairage qui peut être mis en valeur avec puissance et théâtralité mais qui a dû être remplacé en raison de difficultés techniques d'entretien. L'éclairage de remplacement en revanche a un effet plus plat et dépourvu d'émotion, mais il est plus sûr.



Illustration 188:
Façade complète
avec éclairage.



Illustration 189:
Illumination des fa-
çades.

8.8 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 na-

ture: 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 190:
Restaurant.

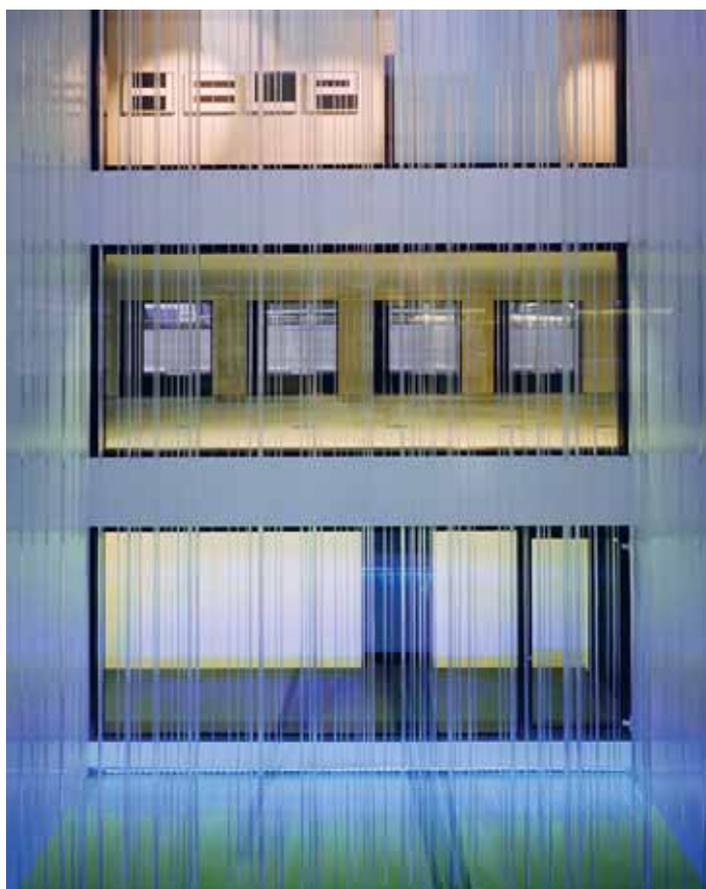
8.9 AZ Medienhaus

L'art dans le patio

La tâche consistait à mieux mettre en valeur la façade qui manquait de caractère. Une autre tâche s'imposait dans les patios où il s'agissait surtout de scénariser l'art dans le bâtiment.

Pour l'éclairage de la façade, il est devenu rapidement clair que les propriétés optiques des luminaires devaient impérativement être définies et surtout précisées et qu'il fallait des surfaces permettant une meilleure perception de la lumière par réflexion. Ceci a été directement testé sur le bâtiment et échantillonné grandeur nature. Ce type d'échantillonnage est le plus intéressant et produit le plus d'effets, car on peut découvrir des phénomènes, des situations et des possibilités qu'on n'aurait pas pu prévoir ainsi. Un échantillonnage renferme autrement des surprises qui sont la plupart du temps positives, car elles apportent de nouvelles connaissances.

Les tuyaux médicaux tombants étaient pensés comme la réminiscence de la clinique qui avait occupé le bâtiment, sous forme d'une installation artistique. L'idée des architectes de transporter la lumière du jour vers le bas a toutefois rapidement échoué. Sont restés les tuyaux en matière synthétique transparents qui pendaient inutilement du plafond et ne formaient plus qu'un filtre clairsemé pour la fenêtre d'en face. Pour mieux réaliser l'idée artistique, les extrémités des tuyaux ont été équipées de lampes LED précises, non éblouissantes. Ce qui donne, en regardant vers le bas, dans le patio, un jeu comme celui qui est reconnaissable sur les photos. Il arrive par ailleurs que les patios ne soient éclairés que via l'installation artistique ou qu'ils interagissent avec la lumière de la fenêtre d'en face. Les deux sont captivants et engendrent également ici des effets parfois surprenants.



*Illustration 191 et
Illustration 192:
Installation artistique en tubes médicaux avec LED.*

8.10 Bâtiment administratif Helvetia

Fenêtres et luminaires

En 1989, le bureau d'architectes Herzog & de Meuron (HdM), connu à l'époque uniquement au niveau local, remporte l'appel d'offres pour l'extension du bâtiment principal des assurances Helvetia sur Girtanersberg à St-Gall. Il a fallu plus de dix ans pour sa réalisation. Helvetia Assurances a fusionné avec Patria et le bureau d'architectes HdM est devenu mondialement connu. L'objectif de regrouper à St-Gall les activités du groupe d'assurances a été réalisé.

La caractéristique extérieure et spectaculaire du bâtiment est la façade dans laquelle un effet patchwork est créé en tournant de manière changeante les différentes fenêtres autour d'une des quatre arêtes. Elle ne faisait pas partie à l'époque de l'appel d'offres. Les bâtiments voisins ainsi que l'environnement végétalisé se fondent en un caléidoscope d'images dans la façade.

Les conditions de disposition des espaces de bureaux ont été définies par Helvetia Patria: l'architecture doit transposer les objectifs de la société. La combinaison d'espaces de bureaux et de zones de circulation a été ré-interprétée comme principe

infaillible. Les bureaux individuels comme les bureaux paysagers ont été refusés, l'organisation de l'espace intérieur favorisant le travail en équipe. Les espaces de bureaux sont séparés de la zone de circulation par une seule vitre occupant la hauteur de l'étage. La valeur d'insonorisation de cette construction est faible de par sa nature. Mais il s'avère dans la pratique que des conversations téléphoniques confidentielles sont tout de même possibles. Le concept graphique se limite à quelques couleurs: murs et plafonds blancs, feutre aiguilleté gris sur un faux-plancher et profils de fenêtres noirs.

Solution visionnaire pour l'éclairage

Pour les architectes, il n'était pas question de penser à une installation avec des luminaires suspendus, parce que ces derniers définissaient un niveau horizontal supplémentaire dans la pièce. Les luminaires sur pied auraient perturbé le rythme de l'ameublement, selon le maître d'ouvrage. En y ajoutant l'exigence de la puissance installée de l'éclairage, soit 8,5 W/m², la situation initiale n'était pas simple. La solution surprend, même si elle n'est pas entièrement nouvelle: les luminaires sur pied «sont debout» au plafond, respectivement trois par lieu de travail, et sont orientés individuellement. HdM est à l'origine du de-

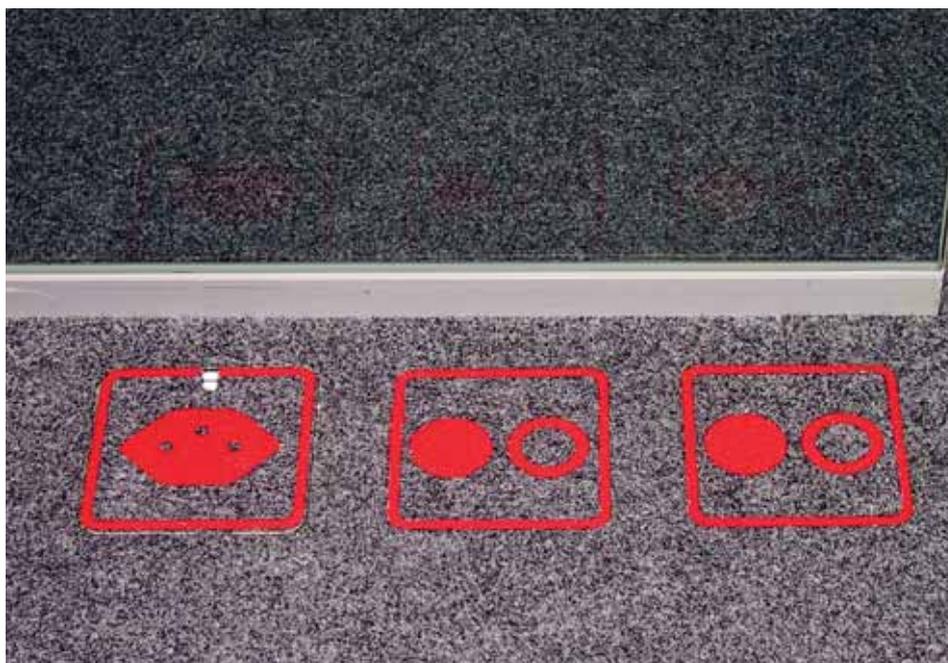


Illustration 193:
Interrupteur de lumière et fiches intégrés dans le sol.



*Illustration 194:
Bâtiment adminis-
tratif au Girtanners-
berg à St-Gall.*



*Illustration 195:
Les luminaires crois-
sent dans le local
depuis le plafond.*

sign du «Pipe» («Tube») et pour sa réalisation, les architectes ont lancé un concours entre trois professionnels de luminaires. Le créateur à succès a livré 700 luminaires à St-Gall, au prix habituel du marché, car les frais de développement ne peuvent être amortis que sur une série bien plus grande. Un tube d'acier flexible, enveloppé de silicone platine transparent, franchit un écran lumineux sphérique et un réflecteur, dans lequel se trouve une lampe fluorescente compacte de 32 watts. En règle générale, un luminaire diffuse une lumière directe sur la surface de travail, garantissant ainsi une luminance élevée, tandis qu'un second luminaire diffuse sa lumière au plafond. Cette lumière indirecte, fortement éparpillée, met en scène le local. Une troisième lampe agit comme un spot éclairant un tableau sur le mur. Les petits trous dans le réflecteur en aluminium produisent des points lumineux brillants. Ils rendent la lampe visible et attrayante en tant qu'objet design. Le danger de cet éclairage ré-

Illustration 196: Le luminaire Pipe (Artemide), conçu par un célèbre artiste, part du plafond et éclaire un bâtiment administratif à St-Gall.



glable individuellement est l'éblouissement qui peut être mal contrôlé. L'expérience montre cependant qu'il faut tenir compte des voisins et des passants lors de l'aménagement du lieu de travail.

Le «Pipe» est un bon luminaire ergonomique ayant une consommation minimale et un design convaincant. Il est utile de signaler que, malgré le développement original, aucun coût supplémentaire n'a été engendré. Les réactions des employés au design des luminaires sont très différentes. Ils sont en général satisfaits de l'éclairage, mais la conception rappelle en revanche différentes choses. La forme spéciale du luminaire et l'image qui en résulte au plafond entraînent une multitude de dénominations.

Détecteur de présence et de lumière

Les détecteurs de mouvement et de fumée sont un tourment pour tout architecte constructeur. Ils collent, prétendument par accident, au plafond et anéantissent souvent le projet. Ces objets sont toutefois nécessaires. Ce que l'industrie propose pour les dispositifs techniquement sensibles reste modeste. Un couvercle à la forme trop prononcée protège le dispositif sensible. Pourquoi n'existe-t-il aucun système où les capteurs et le couvercle sont séparés, de sorte à fournir un choix de couvercles pour les détecteurs? Une mission pour l'industrie!

Herzog & de Meuron ont résolu le problème à leur manière: le détecteur est encastré dans un évidement du plafond en béton et le socle est peint en vert. Seule la pyramide en matière synthétique au charme original sort du crépi du plafond. La commande lumineuse a été solutionnée avec pragmatisme dans les bureaux: au lieu des détecteurs de présence, on a installé une minuterie qui déconnecte la lumière 4 fois par jour sans tenir compte de la présence de personnes. Si l'employé a besoin de lumière, il doit de nouveau mettre l'éclairage sous tension manuellement. Ceci est tout simplement possible avec un grand interrupteur placé dans le sol (Illustration 193).

8.11 LED à la Coop de Pfäffikon

En octobre 2010, le supermarché Coop de Pfäffikon (Zurich), rénové avec un éclairage 100% LED, a rouvert ses portes. En comparaison avec la «technologie des lampes économiques» précédente, Coop économise dans ce magasin 50% d'électricité.

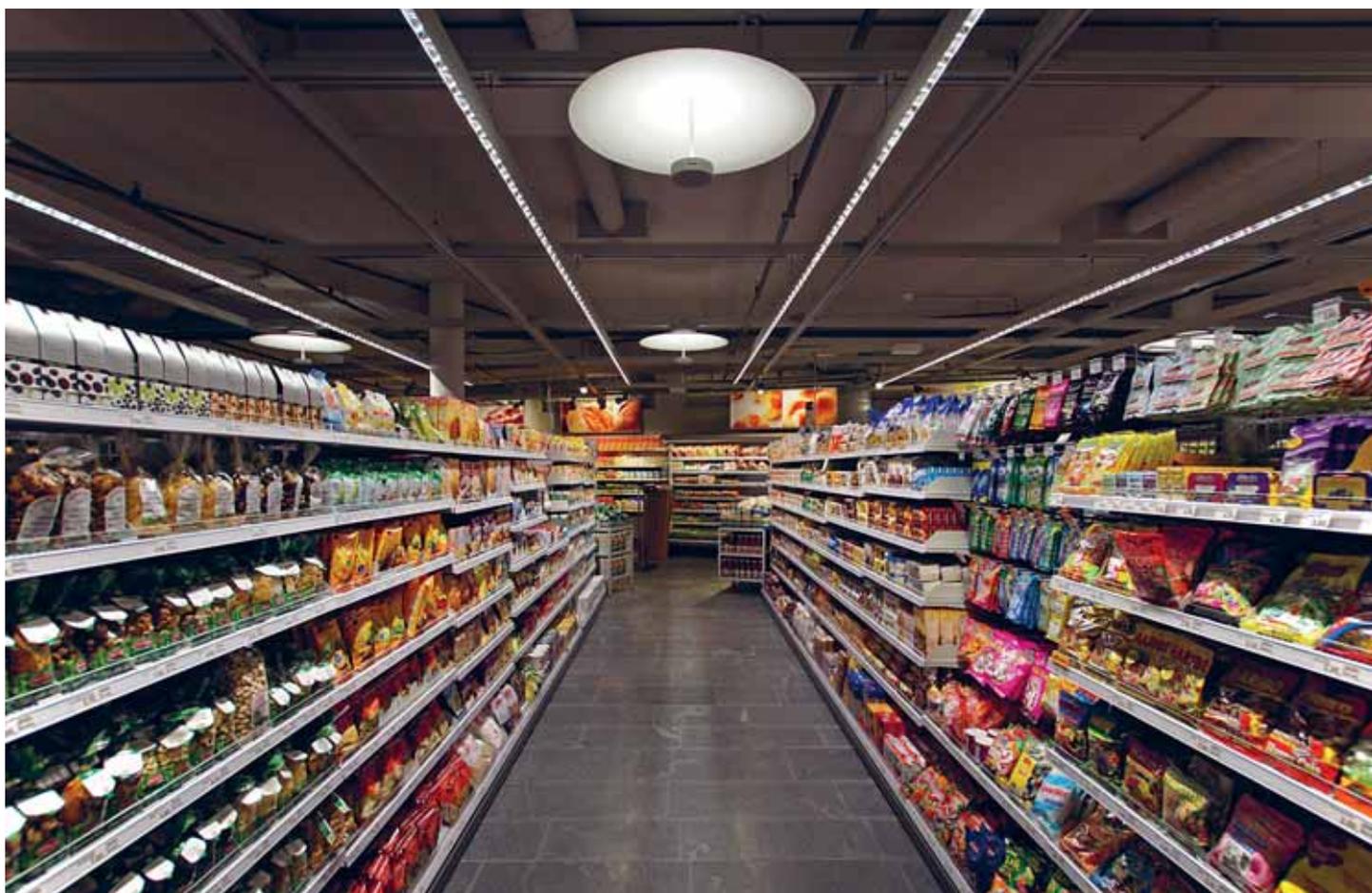
Le concept Pfäffikon

Pour économiser durablement l'électricité avec des LED, il ne suffit pas de remplacer les lampes existantes une par une par des LED. Car même les lampes précédentes installées dans le supermarché sont bien plus efficaces que les lampes à incandescence et halogènes. En utilisant les propriétés spécifiques aux LED, il est possible de réaliser un nouveau concept d'éclairage, une réduction supplémentaire de 30 à 50% est déjà possible actuellement en comparaison avec la technologie des lampes économiques.

L'idée de base du nouvel éclairage du magasin est de monter les luminaires LED nettement plus près des marchandises exposées que cela n'est généralement le cas. Le type de construction compacte et le faisceau lumineux sans chaleur empêchent l'éclairage installé près des articles d'avoir un effet perturbateur. La modélisation du faisceau lumineux a permis d'atteindre un éclairement précis de la zone nécessaire et d'éviter une lumière diffuse inutile. Ce qui permet d'obtenir l'éclairement lumineux souhaité de 700 lux sur la marchandise avec seulement 12 watts par mètre carré de surface de vente. Le résultat est un éclairage extrêmement brillant du support avec un bon effet de contraste. Le nouveau concept d'éclairage du supermarché Coop de Pfäffikon comporte essentiellement quatre composants:

- Rail lumineux LED pour éclairage des rayonnages
- Spots LED pour îlots, vin et diverses accentuations

*Illustration 197:
Eclairage des rayons
avec des rails LED linéaires.*



- Downlight sur vitrines de vente, p. ex. viande et fromage
- Luminaire indirect LED pour améliorer l'impression d'espace
- Le développement des luminaires LED
- Les nouveaux luminaires LED dans le supermarché Coop de Pfäffikon n'étaient pas disponibles en série. De nouveaux produits ont dû être développés avec comme conditions essentielles:
 - Quantité de lumière suffisamment élevée par luminaire
 - Qualité lumineuse maximale des LED
 - Rapport coût-avantage acceptable
 - Disponibilité du module de base LED sur le marché mondial.

Obtenir une grande quantité de lumière sur un petit espace est le plus grand défi actuel des LED. Car les lampes LED produisent aussi de la chaleur, toutefois pas dans le faisceau lumineux, mais à l'arrière de l'élément semi-conducteur. Cette chaleur doit être évacuée, sinon le semi-conducteur est détruit. Pour les grands luminaires LED, l'évacuation de la chaleur est simple, mais elle est plus compliquée pour les spots qui produisent beaucoup de lumière à partir d'un point. Le spot LED utilisé dans le magasin Coop dispose par conséquent d'un petit ventilateur pour évacuer la chaleur. La construction d'un luminaire LED linéaire représentait un second défi, car la lumière de nombreux Power LED efficaces est en forme de points. Les sources lumineuses en forme de points peuvent rapidement donner une lumière irrégulière et éblouir fortement. Ce qui était requis était un éclairage si possible ciblé et homogène avec simultanément un faible taux d'éblouissement.

La rentabilité des LED

Malgré les progrès considérables de ces dernières années, l'éclairage LED tel que nous le connaissons en 2011 n'est pas encore rentable. Les investissements pour un éclairage LED sont en général deux fois supérieurs à ceux d'un éclairage classique. En plus des économies d'énergie, il en résulte une réduction des frais d'entretien: comme les lampes LED peuvent fonction-

ner jusqu'à 20 ans, les coûts de remplacement sont nuls.

Avantage supplémentaire des LED

Pour le calcul de rentabilité, il faut prendre en compte le fait que les LED possèdent d'autres propriétés qui fournissent des avantages supplémentaires précieux dans la vente et les musées.

La lumière LED ne contient ni lumière ultraviolette ni infrarouge: le processus de vieillissement des produits frais (p. ex. fromage, poisson, viande) et des couleurs (vêtements, images) est sensiblement réduit. Exemple: de la charcuterie coupée en tranches sur un étalage exposé à la lumière LED doit être plus rarement jetée que si elle se trouve sous les anciens spots.

Les couleurs des LED sont variables à souhait. En particulier, les tons de blanc peuvent être réglés de manière à présenter la marchandise de manière optimale. Des objets bleus ou verts sont plus résistants sous la lumière blanc froid tandis que des objets jaunes et rouges brillent avec la lumière blanc chaud.

L'équipe de projet

Le projet de poser des LED à Pfäffikon a été élaboré et réalisé par des professionnels de Coop, de Regent Lighting et d'eteam, il a été soutenu financièrement par l'Office fédéral de l'énergie.

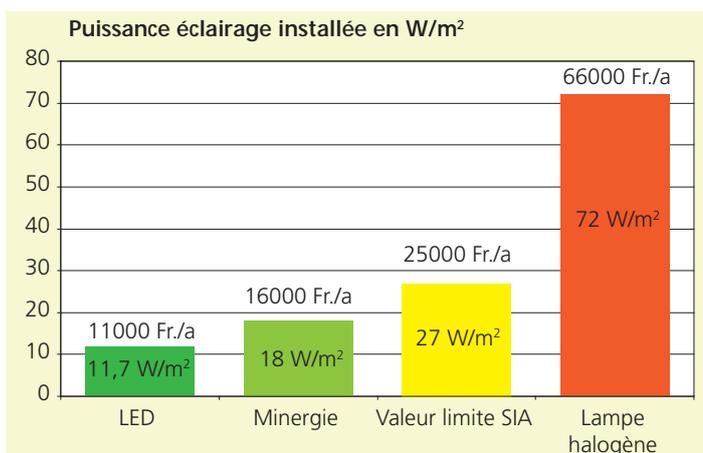


Illustration 198:
Comparaison de la puissance installée de l'éclairage et des coûts de l'électricité dans le supermarché (en Fr. par an).



Illustration 199:
Rails LED en fin de montage.



Illustration 200:
La fraîcheur conservée plus longtemps sous des LED.

8.12 Maison d'habitation avec éclairage optimisé

De nombreuses maisons à profil énergétique bas se situent dans une agglomération. Les dépenses d'énergie pour s'y rendre dépassent souvent le besoin énergétique de la maison. Selon les limites du système d'évaluation de l'efficacité énergétique, les chiffres sont tout à fait différents. Ceci vaut également pour la maison de vacances de la famille Gasser-Stokar à Lugnez. Pour une utilisation type, le trajet en voiture nécessite plus de kilowattheures que pour le chauffage annuel d'une maison Minergie. Pour le maître d'ouvrage, la comparaison est relative: pour se rendre à la montagne, il prend le train de 16h37 à la gare centrale de Zurich. La construction en madriers sur trois niveaux forme avec le vicariat du cloître de Disentis et la chapelle

Antonius datant de 1670, l'extrémité sud de Rumein, proche de Degen à Vella. Derrière les poutres de madrier en bois de pin se cachent 25 cm de rognure de papier imprégnés. La combinaison d'une bonne isolation thermique, de fenêtres de grande qualité et d'une ventilation avec récupération de chaleur ramène le besoin de chauffage à 30 kWh par m² de surface habitable (ce qui correspond à trois litres de mazout). Un poêle à bois et une pompe à chaleur couvrent ce besoin.

L'éclairage des pièces est également exemplaire: la tour d'habitation compte 24 luminaires. A deux exceptions près, ils sont équipés de lampes à économie d'énergie en forme de points ou de bâton et de LED. Avec une puissance spécifique de 3,6 watts par m², la maison Gasser-Stokar se situe de trois quarts en dessous de la moyenne suisse pour les ménages (12,8

Objet
Haus Gasser-Stokar, Rumein

Architecte
Gion A. Caminada, Vrin

Concepteur d'éclairage
Stefan Gasser, eteam, Zurich

Tableau 49:
Bilan de la puissance de l'éclairage optimisé dans la maison Gasser-Stokar

	Position	Luminaire	Lampe	Puissance
Rez-de-chaussée	Table de salle à manger	Luminaire suspendu	Tube fluorescent 16 mm	54 W
	Cuisine	Wallwasher	Tube fluorescent 16 mm	28 W
	Hotte d'aspiration	Luminaire encastré	Lampe économique	11 W
	Coin lecture	Spot	NV Halogène IRC à très basse tension	35 W
	Spensa	Applique	LED	11 W
	Habitat 1	Luminaire sur pied	HV Halogène IRC basse tension	200 W
	Couloir	Downlight	LED	12 W
	WC	Applique	LED	6 W
	Escalier	Applique	Lampe fluocompacte	13 W
1 ^{er} étage	Habitat 2	Luminaire sur pied	Tube fluorescent 26 mm	36 W
	Habitat 2	Applique	Lampe fluocompacte	13 W
	WC/douche	Applique	Tube fluorescent 16 mm	24 W
	WC/douche	Applique	Lampe fluocompacte	13 W
	Chambre à coucher 1	Luminaire sur pied	Tube fluorescent 26 mm	58 W
	Chambre à coucher 1	Luminaire de lecture	LED	4 W
	Escalier	Applique	Lampe fluocompacte	13 W
2 ^e étage	Couloir	Applique	Lampe fluocompacte	13 W
	Chambre à coucher 2	Luminaire sur pied	Lampe fluocompacte	42 W
	Chambre à coucher 2	Luminaire de lecture	LED	4 W
	Chambre à coucher 2	Luminaire de lecture	LED	4 W
	Chambre à coucher 3	Luminaire de bureau	LED	12 W
	Chambre à coucher 3	Luminaire de lecture	LED	4 W
	Chambre à coucher 4	Luminaire de lecture	Spot LED	12 W
	Chambre à coucher 4	Luminaire suspendu	Spot LED	12 W
	WC/salle de bain	Applique	Tube fluorescent 16 mm	24 W
Ensemble du bâtiment			Puissance installée	658 W
			Surface de référence énergétique	182 m ²
			Puissance spécifique	3,6 W/m ²
			Moyenne suisse	12,5 W/m ²

Illustration 201:
Eclairage Minergie dans l'immeuble à Rumein-Degen (GR).





watts/m²). Par conséquent, il ne fait pas sombre dans la maison Gasser. Brillance, brillance! recommande le conseiller d'intérieur à ses clients en faisant de la publicité pour la lumière riche en contraste avec des accents lumineux et des ombrages forts. Pour les occupants, il s'agit de critères pour un espace de vente: «La stratégie utilisée dans le commerce, par exemple une bijouterie, convient-elle à nos habitations?», la question est rhétorique. Car la mise en scène promotionnelle de la lumière mise sur des effets qui sont à peine compatibles avec l'atmosphère tranquille, non agitée d'une pièce d'habitation. Au lieu d'arêtes dures, on trouve dans cette maison de douces jonctions et au lieu de cris d'exclamation exaltés, des îlots de lumière adéquats. Cette forme de différenciation permet une orientation subtile et met en valeur l'architecture du bâtiment. Le grand Louis Kahn pense que la lumière est une aide à la concrétisation de l'architecture. Dans la maison Gasser-Stoker, cette phrase est une réalité fermement établie.



*Illustration 202:
Vues intérieures de
l'éclairage des
pièces.*

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 efficiente de l'énergie dans les éclairages à l'Office fédéral de l'énergie, Ville de Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Minergie, entreprises d'électricité (ewz, EKZ, FMB), aéroport Zurich, Coop, Credit Suisse etc., président de la Commission de la norme SIA 380/4.



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, 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 de CEN.



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 lampes	
www	Description
lighting.philips.ch	Le portail Internet suisse d'un des trois principaux fabricants de lampes.
ecat.lighting.philips.com	Le catalogue électronique de Philips fournit des informations relatives aux lampes et luminaires.
osarm.ch	Le portail Internet suisse d'un des trois principaux fabricants de lampes.
catalogx.myosram.com	Le catalogue électronique de Osram fournit des informations relatives aux lampes et luminaires.
gelifighting.com/de	Portail allemand de General Electric (GE). Osram, Philips et GE produisent 75 % de toutes les ampoules dans le monde.
megaman.de	Lampes économiques et LED de grande qualité comme alternative aux géants Osram et Philips; représentés en Suisse par la société Sog-Unilight AG (sog-unilight.ch).
ledon-lamp.com	Fabricant autrichien de lampes LED de qualité élevée.
ondis.ch	Fournisseur suisse de lampes LED de qualité élevée dans le domaine retrofit.

Fabricants de luminaires et de transformateurs (sélection)	
www	Description
regent.ch	La plus grande entreprise suisse de lampes et d'éclairage.
zumtobel.ch	La société autrichienne est la deuxième sur le marché suisse.
baltensweiler.ch	La société suisse, active depuis 60 ans, est spécialisée dans les luminaires pour des exigences design élevées.
belux.ch	Egalement une société d'éclairage suisse avec des luminaires design pour les pièces d'habitation et les locaux commerciaux.
ribag-licht.com	Société de luminaires avec une vaste offre en luminaires de bureau.
arcotronic.ch	La société offre des adaptateurs pour lampes et ballasts.
tridonic.com	Fabricant de transformateurs et d'appareils de commande pour lampes à décharge et LED.

Mesurage et simulation	
www	Description
metas.ch	Le laboratoire suisse de mesure professionnel de lampes et de luminaires. Lien détaillé: metas.ch/metasweb/Fachbereiche/Optik_und_Faseroptik/Lichtmesslabor.
relux.ch	Logiciel gratuit pour simulation d'installations d'éclairage avec 200 000 luminaires.
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).

Fabricants de LED (sélection)	
www	Description
cree.com	Selon les milieux professionnels, meilleur fabricant de LED des USA.
bridgelux.com	Fabricant américain de composants LED.
nichia.co.jp	Un des principaux fabricants de LED du Japon.
samsungled.com	Samsung, leader des téléviseurs LED, offre également de très bons composants LED pour l'éclairage.
osram-os.com	La société LED d'Osram s'appelle Osram Opto Semiconductors.
philipslumileds.com	La société LED de Philips s'appelle Philips Lumiled.
Associations et organisations (sélection)	
www	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 de l'éclairage.
sia.ch	La Société suisse des ingénieurs et des architectes élabore des normes et des standards pour les bâtiments et les installations.
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.
cen.eu	Organisation pour la planification, l'élaboration et la ratification des standards européens dans tous les domaines économiques à l'exception de l'électrotechnique (CENELEC) et de la télécommunication (ETSI).
cenelec.eu	Comité européen de normalisation dans le domaine électrotechnique.
celma.org	Fédération de 19 associations nationales de fabricants de luminaires et de composants électrotechniques pour luminaires.
zvei.org	Deutscher Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie.
zhagastandard.org	Zhaga élabore des spécifications standardisées de composants LED.
Plateformes d'information	
www	Description
toplicht.ch	Plateforme d'information pour un éclairage efficient avec de nombreux documents à télécharger et une liste de tous les luminaires certifiés Minergie pour les bâtiments de service et industriels. Une page Internet de l'Agence suisse pour l'efficacité énergétique S.A.F.E.
topten.ch	Les meilleures lampes économiques, lampes LED et luminaires domestiques.
faktor.ch	Informations sur les constructions durables, édition de produits imprimés.
darksky.ch	Dark-Sky Switzerland (DSS) est une organisation à but non lucratif engagée pour la réduction de la pollution lumineuse.
on-light.de	Plateforme Internet allemande avec portail d'adresses et informations sur le thème «Lumière dans le réseau».
lichtnet.de	Site Internet du magazine spécialisé «Licht», (presque) unique et principal magazine dans la région germanophone.
lichtkonserve.de	Pour tous ceux qui ne veulent pas faire le deuil des lampes à incandescence, ce site propose des lampes en boîte de conserve.

9.3 Index des mots clés

A

Angle de correction 39
Appareil de mesure de l'énergie et de la puissance 114
Association 7
Assurance qualité 56
Autonomie de la lumière du jour 124

B

Ballasts électroniques 33
Base de données Relux 48
Bâtonnets 8
Bilan énergétique de l'éclairage 19
Bilan énergétique global 18
Binning, classification de LED 75
Black Body 79

C

Calcul des besoins en énergie 39
Caméra IR 103
Caméra numérique 103
Candela 14
Capteur de toit 107
Capteur infrarouge passif 103
Certificat 99
Charte de qualité pour les LED 85
Classes d'efficacité 21
Commande manuelle 55
Cônes 8
Constructions 127
Contrôles d'exécution 57
Courbe de répartition lumineuse 95
Courbe V-lambda 16
Coûts d'entretien 132

D

DALI 102
Déclaration de produit 23
Défaillance précoce 24
Degrés de réflexion 35
DELO 71
Dépression hivernale 12
Détecteurs de présence 55
Diagramme de Söllner 44
Diodes luminescentes 59
Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments EPBD 28
Durée de vie 24, 76

E

Eclairage 118
Eclairage de rue 20
Eclairage des façades 159
Eclairage Minergie 48
Eclairement lumineux 32, 41, 53
Economie d'énergie 26
Effelux 58
Effet biologique 8
Effet lumineux 117
Effets non visuels 11
Effet spatial 117
Efficacité énergétique 12, 157
Efficacité lumineuse 63
EN 13032 97
Energy using Products 22
EN ISO/IEC 17025 97
Enregistreur de lumière 110
Espace chromatique 79
Etiquette énergétique 21, 133
EUP 22
Evaluation des besoins énergétiques 39
Exigences du système 29
Exigences individuelles 29

F

Facteur de conservation du flux lumineux 25
Facteur de lumière du jour 127
Facteur de maintenance 47
Facteur de planification 32
Facteur de puissance 25
Facteur de survie 24
Fichier Eulum 96
Flux lumineux 15, 63
Frais de maintenance 132

G

Gestion thermique 118
Gradation des lampes fluorescentes 66
Gradation des LED 73

H

Heures à pleine charge 29
Human sensitive lighting 123

I

Indice de la pièce 30
 Indice de Rendu des Couleurs IRC 80, 84
 Indice du local 30
 Influence de la température 67
 Intensité lumineuse 14
 Interdiction des lampes à incandescence 22

L

Laboratoire de mesure 100
 Lampe aux halogénures métalliques 67
 Lampes à décharge 67
 Lampes économiques 64
 Lampes fluorescentes 62, 151
 Lampes halogènes 61
 Lampes mates 23
 LED 59, 71, 161
 Ligne d'occultation du ciel 126
 Linteau 38
 Liste de contrôle d'éclairage 51
 Localisation chromatique 84
 Locaux types 51
 Logiciel de justificatif «ReluxEnergyCH» 49
 Lumen 15
 Lumière bleue 86
 Lumière de vapeur métallique 159
 Lumières en biais 34
 Luminaires design 92
 Luminaires d'intérieur 89
 Luminaires professionnels 89
 Luminaires spéciaux 159
 Luminosité 35
 Lux 16

M

Marché des consommateurs 20
 Marché professionnel 19
 Maximum photopique 11
 Mercure 25
 Métaux des terres rares 72
 Minergie 119, 122
 Modélisation 46
 Modulation des couleurs pour les LED 74
 Module Minergie 121

N

Norme de base SN EN 12464 44
 Norme DIN 5031-1 45
 Norme européenne pour l'évaluation des bâtiments 46
 Norme SIA 380/4 28, 36

O

Obligation de déclaration 23
 Ombres portées 127
 Optimisation 119
 Optimisation de fonctionnement 128
 Optimisation énergétique 124
 Outil 49

P

Partie indicateur énergétique Éclairage 28
 Perception look-up 10
 Perception visuelle de l'humain 9
 Percevoir 7
 Photogoniomètre 68
 Photogoniomètre à miroir tournant 95
 Photogoniomètre en champ proche 96
 Plan gris 118
 Planification de l'éclairage 117
 Pollution électromagnétique 88
 Pollution lumineuse 134
 Potentiel d'économies 133
 Procédé CCR 74
 Procédé PWM 74
 Procédé UGR 45
 Processus de la perception 8
 Processus visuels 8
 Profondeur du balcon 38
 Protection solaire 38
 Puissance du système 52, 63
 Puissance installée 32

Q

Quotient de lumière du jour 126

R

Radiateur thermique 59
 Rails lumineux 113
 Rapport vitrage/sol 54
 Rayonnement électromagnétique 6
 Rayonnement global 111
 Rayonnement ultraviolet 25

Réflexion dans le local 38
Réglage de la lumière 124
Réglage de la luminosité constante 125
Règle des 45° 127
Régulation automatique 55
Régulation de la lumière 39
Régulation semi-automatique 55
Relux-Suite 50
Remplacer les luminaires 128
Rendu des couleurs 25
Rentabilité 115, 132
Répartition 84
Répartition de l'éclairage 153
Répartition lumineuse 121
Ressenti de la lumière 8
Retrait 23
Rythme sommeil-éveil 12

S

SIA 2024 119
Spectre visible 77
Sphère d'Ulbricht 67
Standard Minergie 48
Surface de référence énergétique 29
Surface de rémission 161
Système colorimétrique CIE 79
Système de gestion de la lumière 103
Système de gestion de l'éclairage 109

T

Tâche visuelle 151
Technique Cree-True-White 74
Technique PAL 74
Temps d'allumage 25
Temps de démarrage 25
Transmission de la lumière 54
Transmission du signal 101
Triangle des couleurs 79
Type de culot 61, 129
Type de lampe 63

U

Utilance 35
Utilisation de la lumière du jour 54
Utilisation régulière 55
Utilisation sporadique 55
Utilisation standard 40

V

Valeur cible SIA 380/4 43
Valeur limite SIA 380/4 40, 43
Valeurs cibles 29, 39

Valeurs de projet 29
Valeurs limites 29
Voir et percevoir 7

