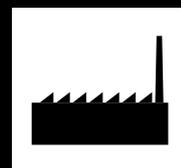




*éclairage*

Éclairage  
dans l'industrie



## **Eclairage des bureaux, dans l'industrie et les surfaces de vente**

### **Eclairage dans l'industrie**

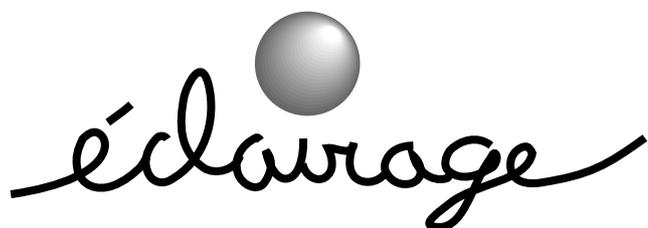
Le principal poste budgétaire en matière d'énergie est souvent représenté dans l'industrie par l'électricité. A l'exception des domaines industriels nécessitant des flux énergétiques particulièrement importants pour la production, l'éclairage constitue dans les bâtiments industriels une part substantielle de ce poste.

Celui-ci revêt, dans l'industrie encore plus qu'ailleurs, une importance particulière en ce qui concerne l'utilisation des bâtiments : il permet de réduire les risques d'accident, d'accroître le confort des employés et d'augmenter l'efficacité du travail. Traduits en termes économiques, ces critères essentiels du monde industriel sont autant de raisons, qui s'ajoutent aux impératifs d'économies d'énergie, incitant à une planification rigoureuse et à une réalisation soignée des installations d'éclairage.

Ce manuel a pour but de faciliter la tâche des praticiens, en vue d'atteindre ces objectifs. Des exemples de réalisations montrent que des économies d'électricité importantes (plus de la moitié de la consommation) peuvent être obtenues, en particulier, lors de rénovations de halles industrielles, tout en améliorant les qualités intrinsèques de l'éclairage. Le manuel illustre les possibilités offertes par la lumière du jour, généralement abondante dans les bâtiments industriels, pour atteindre ces économies. L'ouvrage est conçu de façon pratique, dans le but de permettre aux praticiens d'appliquer ces techniques d'éclairage nouvelles à des projets concrets. Une « check-list », facilitant cette tâche, complète ce dernier.

ISBN 3-905233-45-2  
Edition originale: ISBN 3-905233-49-5

1994, 100 pages  
N° de commande 724.329.3f



# Éclairage dans l'industrie



## Document français

### ■ Direction de projet :

Prof. J.-L. Scartezzini, ing. physicien EPFL, CUEPE/Université de Genève

### ■ Rédaction :

D. Chuard, architecte, Sorane SA, Lausanne  
J. Lausset, éclairagiste, Ch. Perrottet Ing.-Conseils SA, Epalinges  
Dr. J.-J. Meyer, ergonomiste, UMTE, Université de Genève  
B. Paule, architecte, CUEPE, Université de Genève  
Prof. J.-L. Scartezzini, ing.-phys., EPFL, CUEPE, Université de Genève

### ■ Dactylographie :

S. Riser, secrétaire, CUEPE/Université de Genève

### ■ Crédit photographique :

CUEPE/Université de Genève, Piazza Ing.-Cons., LESO-PB/EPFL, Amstein et Walther Ing.-Cons.

### ■ Associations de soutien :

ASE Association suisse des électriciens  
SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes  
SLG Association suisse de l'éclairage  
UTS Union technique suisse

### ■ Mise en page et photocomposition :

City Comp SA, Morges

## Document allemand

### ■ Direction de projet :

Christian Vogt

### ■ Auteurs :

Christian Vogt, éclairagiste, Amstein & Walther SA, Zurich  
Carl-Heinz Herbst, éclairagiste, Amstein & Walther SA, Zurich  
Mario Rechsteiner, éclairagiste, Amstein & Walther SA, Zurich

ISBN 3-905233-45-2

Edition originale: ISBN 3-905233-49-5

Copyright © 1994 Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, mai 1994.

Reproduction d'extraits autorisée avec indication de la source.

Diffusion : Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (Numéro de commande 724.329.3f)

Form 724.329.3f

06.94

750



# Avant-propos

Le programme d'action "Construction et Energie" s'étend sur une durée de 6 ans (1990-1995) et se compose des trois programmes d'action suivants:

- PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions
- RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité
- PACER – Energies renouvelables

Ces programmes d'action sont menés en étroite collaboration avec l'économie, les Hautes-Ecoles et la Confédération; ils entendent promouvoir la créativité dans le domaine de l'énergie et de la construction, afin de réduire la consommation de matières premières et d'énergies non renouvelables et de diminuer l'impact sur l'Environnement par un engagement accru des praticiens.

Le programme RAVEL a pour objectif d'améliorer les compétences des professionnels en vue d'une utilisation rationnelle de l'énergie électrique. Outre les aspects de la sécurité et de la production, prioritaires jusqu'à aujourd'hui, il est devenu indispensable de prendre d'avantage en compte celui de l'efficacité d'utilisation de l'électricité. Dans le cadre de ce programme, une matrice de consommation a été élaborée qui définit dans les grandes lignes les domaines à considérer. Les processus dans l'industrie, le commerce et les services sont ainsi traités parallèlement aux problèmes d'utilisation de l'électricité dans les bâtiments. Dans ce contexte, le public visé par ce programme est constitué des spécialistes de formations diverses et des décideurs qui sont amenés à gérer des investissements en matière d'équipement et de processus.

## ■ Activités

Les activités du programme RAVEL se composent principalement de projets d'étude et de diffusion de connaissances de base, qui se traduisent par des cycles de formation et de perfectionnement, ainsi que par de l'information. Le transfert de connaissances nouvelles est orienté principalement vers la pratique. Il repose sur des publications, des cours et des manifestations diverses. Une journée d'information annuelle permet de présenter et de discuter des nouveaux résultats et développements, ainsi que des tendances nouvelles au niveau de l'utilisation rationnelle de l'énergie.

Les personnes intéressées trouveront dans le journal "Construction et Energie" de plus amples informations sur le vaste éventail de possibilités en matière de formation continue. Cette publication paraît deux à trois fois par année et peut être obtenue sans frais auprès du LESO-PB, EPFL, 1015 Lausanne. En outre, chaque personne participant à un cours ou à une réunion recevra une publication spécialisée à cette occasion. Ces publications peuvent aussi être commandées sans engagement auprès de l'Office Central des Imprimés et du Matériel, 3000 Berne.

## ■ Compétences

Afin de pouvoir mener à bien cet ambitieux programme de formation, un concept d'organisation et d'élaboration a été adopté. Celui-ci permet de s'assurer, en particulier, de la supervision des activités du programme par des spécialistes, ainsi que du soutien des associations



professionnelles et des institutions de formation des domaines concernés. Une commission composée de représentants des associations, écoles et organisations intéressées définit le contenu du projet considéré et assure la coordination avec les autres activités du programme. Des organisations du domaine définissent les cours de formation continue souhaitables, alors qu'une équipe de direction de programme exerce le suivi de leur préparation (Direction de programme RAVEL: Dr. Roland Walthert, Werner Böhi, Dr. Eric Bush, Jean-Marc Chuard, Hans-Ruedi Gabathuler, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, Dr. Daniel Spreng, Felix Walter, Dr. Charles Weinmann ainsi que Eric Mosimann, OFQC). L'élaboration des projets d'étude et de diffusion est pris en charge par des groupes de travail, qui sont appelés à résoudre des tâches spécifiques, dont le contenu, la durée et le coût sont définis.

## ■ Documentation

Le présent document a été soigneusement élaboré et a été diffusé après une période probatoire et une évaluation dans le cadre d'un cours-pilote. Ses auteurs ont conservé toute liberté d'apprécier et de considérer à leur gré divers points particuliers. Ils portent dans ce sens l'entière responsabilité de leur texte. Toute insuffisance mise éventuellement en évidence lors de la diffusion de ce document fera l'objet d'une correction. L'Office fédéral des questions conjoncturelles ou le directeur du cours M. Prof. J.-L. Scartezzini acceptent volontiers toute suggestion. Nous saisissons à cette occasion la chance de remercier ici toutes les personnes dont la précieuse collaboration a permis la parution de ce document.

Dr. B. Hotz-Hart  
Vice-directeur de l'Office  
fédéral des questions  
conjoncturelles



# TABLE DES MATIERES

■	<b>Introduction</b>	<b>7</b>
■	<b>1. Exemples de réalisations</b>	<b>9</b>
1.1	Rénovation de l'éclairage d'une halle	11
1.2	Rénovation de l'éclairage d'un entrepôt	13
1.3	Rénovation d'une fabrique de peinture	16
1.4	Amélioration des conditions de travail	18
■	<b>2. Caractéristiques du projet d'éclairage</b>	<b>21</b>
2.1	Aspects énergétiques	23
2.2	Aspects ergonomiques	24
2.3	Evaluation globale du projet	26
2.4	Stratégie globale du projet	31
2.5	Modes d'éclairage artificiel	32
2.6	Tâches visuelles astreignantes	32
2.7	Commande de l'éclairage	37
2.8	Influence de la couleur	39
2.9	Réalisation exemplaire	39
■	<b>3. Eclairage naturel</b>	<b>43</b>
3.1	Spécificité de la lumière naturelle	45
3.2	Ouvertures	45
■	<b>4. Eclairage de secours et de sécurité</b>	<b>53</b>
4.1	Eclairage de secours	55
4.2	Eclairage de sécurité	56
■	<b>5. Maintenance</b>	<b>57</b>
5.1	Encrassement des installations	59
5.2	Viellissement des sources	60
5.3	Considérations économiques	60
5.4	Remplacement des sources	61



■	<b>6. Sources</b>	<b>63</b>
	6.1 Considérations générales	65
	6.2 Choix des sources	67
■	<b>7. Luminaires</b>	<b>71</b>
	7.1 Choix des luminaires	73
	7.2 Importance du rendement	73
	7.3 Disposition des luminaires	74
	7.4 Conditionnement des locaux	74
■	<b>8. Appareils auxiliaires</b>	<b>77</b>
	8.1 Conditions générales	79
	8.2 Ballasts pour tubes fluorescents	79
■	<b>9. Check-list</b>	<b>83</b>
■	<b>10. Bibliographie</b>	<b>85</b>
■	<b>11. Répertoire alphabétique</b>	<b>87</b>
■	<b>Liste des publications RAVEL</b>	<b>91</b>



# INTRODUCTION

## ■ Pourquoi ce manuel ?

L'attention principale, en matière d'éclairage, a été portée ces dernières années sur les bureaux et les postes de travail munis d'écrans de visualisation. L'étude des besoins individuels, l'optimisation des stratégies d'éclairage et l'élaboration de connaissances nouvelles ont permis à des dispositifs d'éclairage plus performants de voir le jour dans ce domaine. L'éclairage industriel est demeuré, en contre partie, un parent pauvre.

Dans certains secteurs de l'industrie de transformation, la consommation d'énergie imputable aux processus industriels est modérée (cf. figure 1). Si les dépenses de chauffage sont souvent modiques, il arrive fréquemment que la dépense d'énergie à des fins d'éclairage figure au premier rang de la consommation électrique. Pour de simples considérations économiques (cf. figure 2), il vaut donc la peine d'accorder une plus grande attention à la planification de l'éclairage et d'envisager la possibilité d'assainir les installations de plus de dix ans (rénovation).

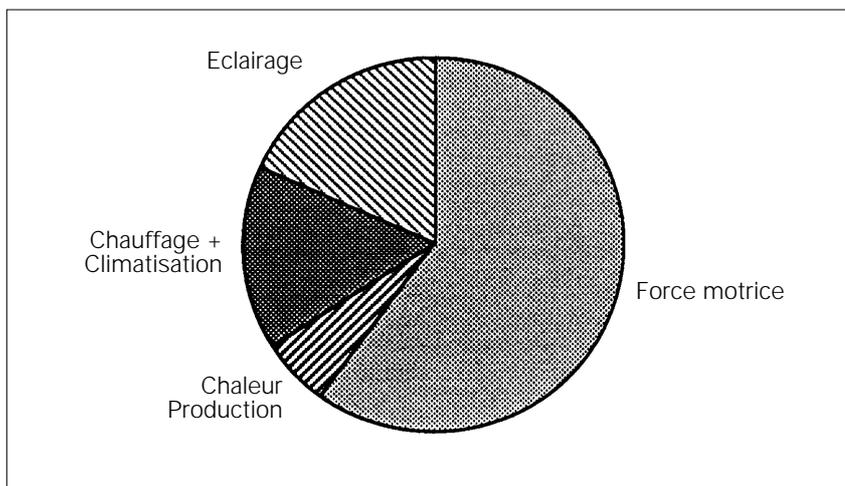


Fig. 1 : Répartition de la consommation d'électricité dans l'industrie des machines (consommation nationale 32'000 MWh/an, 2'800 emplois) ; IDE chaleur = 590 MJ/m<sup>2</sup>.an, IDE électricité = 500 MJ/m<sup>2</sup>.an.

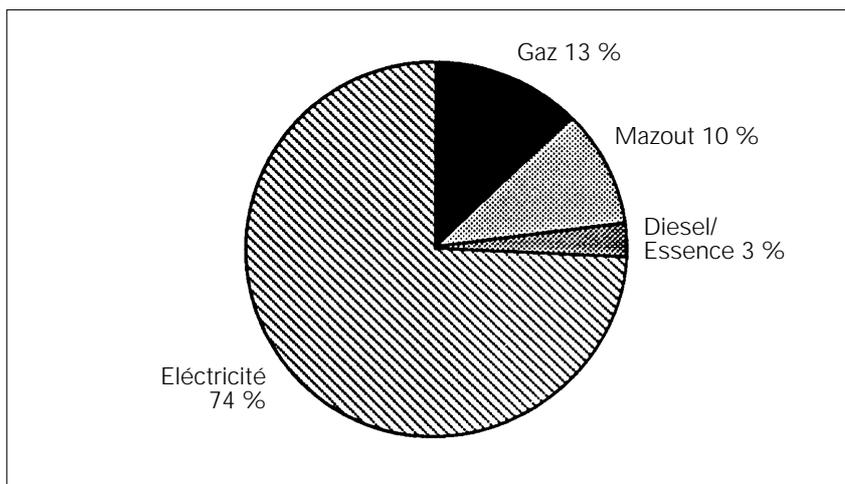


Fig. 2 : Coût relatif des différents postes de consommation énergétique dans l'industrie.

De nos jours, rationaliser - un processus vital et continu pour l'économie - signifie utiliser toujours plus d'écrans et d'autres moyens d'affichage électronique. Si l'on considère le fait que 80 à 90 % de l'information dans l'industrie est de nature visuelle (affichage des états de service, visualisation des processus de production, etc.), il apparaît donc naturel de concentrer les efforts de rationalisation sur les éléments qui influen-



cent notre perception visuelle (dispositif d'éclairage, lumière naturelle, etc.). Etant donné que celle-ci a une influence sans cesse croissante sur la productivité d'une entreprise, et que les fournisseurs de matériel d'éclairage, s'efforcent depuis quelques années de commercialiser des systèmes de plus en plus efficaces en termes d'énergie, il n'est plus admissible aujourd'hui de négliger cet aspect dans l'industrie comme par le passé. Des conditions d'éclairage inappropriées, ainsi qu'une consommation excessive et inutile d'énergie électrique, sont souvent la conséquence de cette négligence. D'autres facteurs y sont étroitement liés : le risque accru d'accident, la baisse de productivité et un inconfort visuel manifeste.

Les solutions nouvelles en matière d'éclairage se caractérisent généralement par un perfectionnement technique constant. L'offre en matière de sources s'accroît ; leur rendu des couleurs et leur efficacité lumineuse augmentent régulièrement, alors que leurs dimensions s'amenuisent. Parallèlement à ces développements technologiques et à l'augmentation du choix de luminaires, des exigences toujours plus sévères sont formulées en ce qui concerne les conditions de travail (ergonomie visuelle).

Il n'existe, toutefois, pas de solution générale applicable à chaque projet d'éclairage. Chaque cas particulier doit être examiné en fonction de différents critères d'appréciation (objectifs et subjectifs), de la situation existante et de considérations économiques. C'est à ce prix seulement qu'il est possible de mettre en œuvre la solution la plus favorable.

## ■ A qui s'adresse ce manuel ?

Ce manuel a été conçu pour les praticiens. Il présente, sur la base d'exemples (voir chapitre 1), différentes solutions en matière d'éclairage industriel, qui permettent à la fois d'obtenir de meilleures conditions de travail et de réduire la consommation d'électricité.

Il doit permettre au lecteur d'analyser objectivement des installations d'éclairage industriel sur le plan de la technique, de la consommation d'énergie et de l'ergonomie visuelle. Celui-ci sera ainsi en mesure d'élaborer des propositions d'amélioration des installations, de les transposer à la pratique et de procéder aux opérations de rénovation correspondantes.

## ■ Structure du manuel

Des exemples de réalisation sont présentés dans la première partie du document (voir chapitre 1). Une description est donnée, ainsi qu'une présentation de leurs caractéristiques propres.

Le contexte théorique de l'éclairage industriel est abordé dans une seconde partie (voir chapitres 3 à 8). Des aspects complémentaires de l'éclairage y sont traités : il s'agit, en particulier, de l'entretien des installations et de l'éclairage de sécurité.

Le chapitre 2 comprend des instruments de travail ; ces derniers sont opérationnels et doivent servir à améliorer la planification de l'éclairage, en particulier sur le plan énergétique.

La dernière partie comprend des références bibliographiques et un répertoire alphabétique, ainsi qu'une " check-list ", résumant les points essentiels de cet ouvrage.

Les auteurs du manuel ont volontairement cherché à structurer celui-ci de façon à tirer parti des prédispositions autodidactes du lecteur. Des renvois éventuels et des légendes figurent dans le texte. Les points particulièrement importants sont mis en évidence par des encadrés.



# 1. EXEMPLES DE REALISATIONS 11

- 1.1 Rénovation de l'éclairage d'une halle 11
- 1.2 Rénovation de l'éclairage d'un entrepôt 13
- 1.3 Rénovation d'une fabrique de peinture 16
- 1.4 Amélioration des conditions de travail 18



# 1. EXEMPLES DE REALISATIONS

## 1.1 RÉNOVATION DE L'ÉCLAIRAGE D'UNE HALLE

L'exemple suivant, relatif à la rénovation de l'éclairage d'une halle industrielle, montre qu'en matière d'évaluation des performances d'une installation d'éclairage, la consommation d'électricité, bien qu'essentielle, doit être prise en compte avec d'autres aspects.

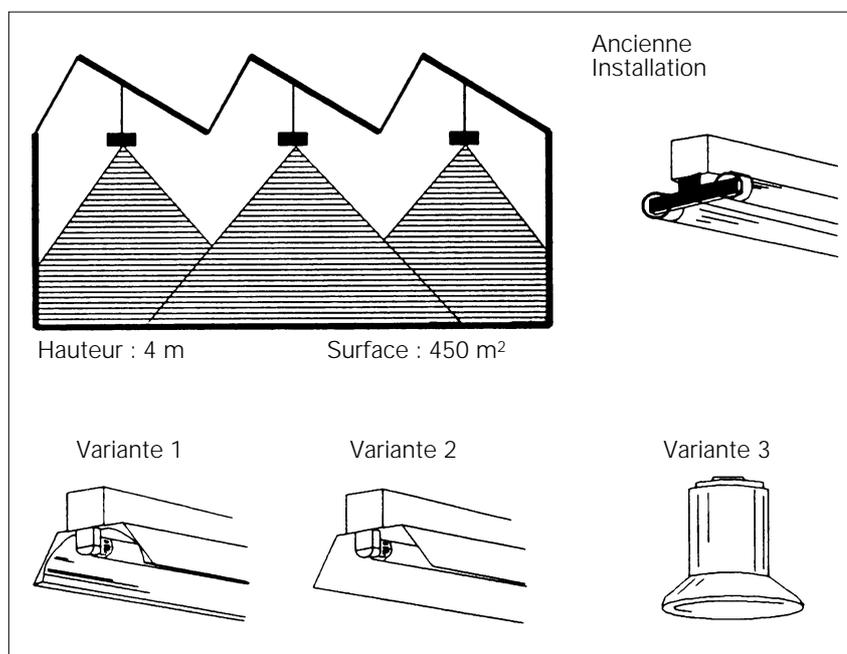


Fig. 1.1 : Rénovation de l'éclairage d'une halle.

	Ancienne installation	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Type de luminaires	Luminaire-réglette à deux tubes, sans réflecteur	Luminaire-réglette à un tube avec optique miroitée	Luminaire-réglette à un tube avec réflecteur blanc	Luminaire ponctuel lampe à décharge haute pression
Rendement des luminaires	97 %	85 %	77 %	82 %
Type de sources	Standard, T 65 W	Trois bandes, T 58 W	Trois bandes, T 58 W	Sodium HSE 250 W
Rendu des couleurs	60 - 69	80 - 89	80 - 89	60
Flux lumineux	4600 lm	5200 lm	5200 lm	22000 lm
Ballast	Magnétique (KVG) P = 10 W	Faibles pertes (VVG) P = 6 W	Faibles pertes (VVG) P = 6 W	Appareil auxiliaire, P = 25 W
E <sub>horizontal</sub>	300 lx	320 lx	300 lx	380 lx
E <sub>vertical</sub>	230 lx	100 lx	130 lx	65 lx
Puissance installée spécifique	4,3 W/m <sup>2</sup> /100lx	1,9 W/m <sup>2</sup> /100lx	2,3 W/m <sup>2</sup> /100lx	1,8 W/m <sup>2</sup> /100lx
Puissance de raccordement	5,8 kW	2,9 kW	3,1 kW	3,3 kW

Table 1.1 : Caractéristiques des variantes de rénovation.

## Observation

On remarque que les trois nouvelles variantes proposées permettent de réduire la puissance spécifique de l'installation, ainsi que celle de raccordement, de plus de moitié. Du point de vue énergétique, la troisième variante est la plus efficace : elle possède la plus faible puissance installée spécifique ( $1,8\text{W}/\text{m}^2/100\text{Lx}$ ). Cette variante se distingue, toutefois, par les inconvénients suivants :

- l'éclairage vertical est faible (65 lux) : celui-ci doit se situer entre 30 et 70 % de l'éclairage horizontal ;
- elle fait appel à des sources ponctuelles (forts contrastes de luminance et ombres marquées) ;
- l'indice de rendu des couleurs est faible (influence sur la faculté de séparer les différentes couleurs).

On préfère donc les variantes 1 et 2 à la troisième. Compte tenu de leur faible consommation par rapport à l'installation initiale, il est même possible de faire appel à la seconde variante (consommation légèrement supérieure) ; celle-ci se caractérise par un éclairage vertical de 30 % supérieur, ce qui se traduit par une ambiance visuelle plus agréable et une influence positive sur le bien-être des travailleurs.

L'analyse de la valeur utile de cette variante, effectuée par une méthode multi-critères, confirme ce choix ; elle fait l'objet du paragraphe 2.3.



Fig. 1.2 : Illustration de la seconde variante de rénovation.



## 1.2 RÉNOVATION DE L'ÉCLAIRAGE D'UN ENTREPOT

L'exemple suivant est consacré à la rénovation des entrepôts de l'Office Central Fédéral des Imprimés et du Matériel (OCFIM) à Berne [8].

### ■ Comparaison des installations

Les caractéristiques de l'ancienne installation sont les suivantes :

- Locaux pratiquement borgnes, faible éclairage naturel.
- Heures de service : 13 heures/jour.
- Utilisation des locaux : 250 jours/an.
- Facteur d'exploitation de l'installation :  $f_e = 0.95$ .



Fig. 1.3 : Vue de l'ancienne installation.

Le facteur d'exploitation de l'installation a été mesuré sur une période limitée, puis interpolé à l'ensemble de l'année. Les différents secteurs étant enclenchés et déclenchés séparément, un facteur de correction a été appliquée à chacune d'elles pour obtenir le facteur d'exploitation global [8]. A partir des heures de service, du facteur d'exploitation global et du nombre de jours d'utilisation des locaux, on peut déterminer la durée annuelle d'enclenchement de l'éclairage :

Durée annuelle d'exploitation :  $250 \text{ j/an} \times 13 \text{ h/j} \times 0.95 = 3088 \text{ h/an}$

### Observation

Grâce à une nouvelle répartition sectorielle de l'éclairage, il a été possible de réduire considérablement la durée annuelle d'exploitation de l'éclairage (2'470 h/an au lieu de 3'088 h/an) et de réaliser ainsi de précieuses économies d'énergie.



Fig.1.4 : Vue de la nouvelle installation.

Les possibilités d'assainissement, exploitables pour le local considéré dans cet exemple, sont les suivants :

- Régulation asservie à la lumière naturelle
- Commutation ou régulation asservie à la présence de personnes
- Utilisation de ballasts électroniques ou à faibles pertes
- Nouvelle disposition des luminaires
- Autres sources

Du fait de la très faible part de lumière naturelle dans ce local, il n'est pas judicieux de prévoir une commande asservie à celle-ci. Les anciens vitrages des fenêtres (verres opals) ont néanmoins été remplacés par du verre clair, ce qui a permis d'augmenter la part de lumière naturelle et d'engendrer des effets positifs sur le personnel [8].

Les anciens dispositifs d'éclairage (plus de 10 ans d'âge) ont été remplacés par des luminaires à paralumes (protection contre l'éblouissement), munis de ballasts électroniques (ballasts EVG).

En raison des déplacements fréquents des collaborateurs et des collaboratrices, on a estimé qu'il n'était pas judicieux de prévoir un système de commande asservie à des détecteurs de présence. L'éclairage a été subdivisé en nouveaux secteurs. Les zones de rayonnage ont été équipées de trois rangées de luminaires ; les zones sans rayonnages de deux.



Les anciens tubes fluorescents (D 38 mm, 40 W, 2500 lm) ont été remplacés par des tubes à trois bandes (D 26 mm, 58 W, 5400 lm). Cette seule mesure a permis de réduire la puissance installée d'environ un tiers, ce type de source présentant une efficacité lumineuse d'environ 30 % supérieure.

Le nombre de luminaires a pu être ramené de 2300 unités de 54 W (tube 40 W + ballast magnétique KVG 14 W) à 1600 unités de 55 W (tube 52 W + ballast magnétique EVG 6 W).

Pour l'ensemble des entrepôts du bâtiment (du rez-de-chaussée au 4ème étage), on obtient les valeurs énergétiques et les coûts caractéristiques donnés ci-après.

## ■ Economies d'énergie

	Ancienne installation	Nouvelle installation
<b>Consommation d'énergie</b>		
Puissance de raccordement [kW]	124,2	93
Consommation annuelle [kWh]	383'405	229'710
<b>Coûts d'investissement</b>		
Coût des luminaires [Fr.]	0	235'200
Coût d'installation [Fr.]	0	94'440
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>329'600</b>
<b>Frais d'exploitation annuels</b>		
Coût d'entretien [Fr.]	6'900	6'080
Coût de remplacement des lampes [Fr.]	17'183	4'874
Coût de l'énergie [Fr.]	51'729	31'735
<b>Total</b>	<b>75'812</b>	<b>42'689</b>
<b>Coûts annuels de l'éclairage</b>		
Frais d'exploitation [Fr.]	75'812	42'689
Amortissement du capital [Fr.]	0	32'685
<b>Total</b>	<b>75'812</b>	<b>75'374</b>
<b>Coûts globaux</b>		
Coût d'exécution [Fr.]	0	329'600
Frais d'exploitation [Fr.]	1'137'180	640'335
<b>Total</b>	<b>1'137'180</b>	<b>969'935</b>
<b>Temps de retour sur l'investissement [années]</b>		<b>10</b>

Table 1.2 : Comparaison des consommations énergétiques des deux installations.

Les hypothèses de calcul utilisées dans cette comparaison sont les suivantes :

Prix de base de l'électricité	[Fr./kW/an]	36.00
Tarif professionnel - diurne	[Fr./kWh]	0.11
Tarif professionnel - nocturne	[Fr./kWh]	0.06
Durée de vie de l'installation	[années]	15
Fonds propres	[%]	100
Rémunération du capital	[%]	6.5
Augmentation du prix de l'électricité	[%]	1.5

## Observation

L'utilisation de nouvelles sources, de ballasts électroniques et de nouveaux luminaires, ainsi qu'une meilleure répartition sectorielle des luminaires, permet d'économiser près de 160'000 kWh/an pour un retour sur investissement de 10 ans. Cela a été obtenu en améliorant simultanément le confort visuel (absence de scintillement), le rendu des couleurs et la protection contre l'éblouissement.

## 1.3 RÉNOVATION D'UNE FABRIQUE DE PEINTURE

Cette rénovation porte sur une halle industrielle de fabrication de peinture (bâtiment conçu en 1967), située à Renens s/Lausanne. Son volume est de 2'700 m<sup>3</sup>, sa hauteur comprise entre 3.8 et 6.5 mètres, et sa surface égale à 528 m<sup>2</sup>. Elle est subdivisée en 6 secteurs de production différents (fabrication de peinture émaillée, dispersion, etc.).

La halle est éclairée en partie par la lumière du jour ( $0.25 \% < D < 2.6 \%$ ), au travers de sheds orientés au nord ; l'ensemble des vitrages représente 228 m<sup>2</sup>. L'apport d'éclairage naturel est insuffisant dans certaines parties de la halle (effet d'écran du à un autre bâtiment). L'éclairage artificiel est enclenché en permanence dans ces zones (zones telles que  $D < 1 \%$ ).

Les caractéristiques photométriques de la halle sont les suivantes :

Facteurs de réflexion	plafond	$\rho_p = 0.5$
	murs	$\rho_m = 0.3$
	sol	$\rho_s = 0.1$
Indice du local		$k = 1.59$
Facteur d'utilance		$F_u = 0.44$

Des essais, limités dans le temps, ont été entrepris en vue de tester les propositions de rénovation envisagées. Celles-ci ont pour but d'aboutir aux améliorations suivantes :

- économies d'énergie ;
- augmentation de l'éclairage au poste de travail ;
- amélioration du confort et du rendu des couleurs.

Une comparaison des installations est donnée ci-après.

## ■ Comparaison des installations

### Ancienne installation

*Luminaires :* bitubes à armature simple

*Sources :* tube fluorescent Philips TL-F 33, 2 x 40 W, D 38 mm, 2060 lm



Appareils auxiliaires : ballasts magnétiques (KVG, P = 13 W)  
 Commande : manuelle par secteur  
 Efficacité lumineuse : 39 lm/W y.c. ballasts (51 lm/W sans ballasts)  
 Eclairage moyen : 90 lux sur le plan de travail (0.9 m du sol)

### Nouvelle installation

Luminaires : luminaires à réglette avec réflecteur à haut rendement en acier thermolaqué  
 Sources : tube fluorescent 1 x 50 W, D 26 mm, 5200 lm  
 Appareils auxiliaires : ballasts électroniques HF (EVG, P= 5 W)  
 Commande : gradation par paliers, asservie à la lumière du jour  
 Efficacité lumineuse : 94 lm/W y.c. ballasts  
 Eclairage moyen : 280 lux sur le plan de travail

La table suivante donne une comparaison des consommations des deux installations ; l'analyse des coûts est présentée à la figure 1.5.

Grandeurs	Ancienne installation	Nouvelle installation
Nombre de luminaires	72	60
Puissance installée	14.5 W/m <sup>2</sup>	6.5 W/m <sup>2</sup>
Puissance de raccordement	7.7 kW	3.3 kW
Consommation annuelle	15'500 kWh	5800 kWh
Economie d'énergie	—	63 %

Table 1.3 : Comparaison des installations sur le plan énergétique.

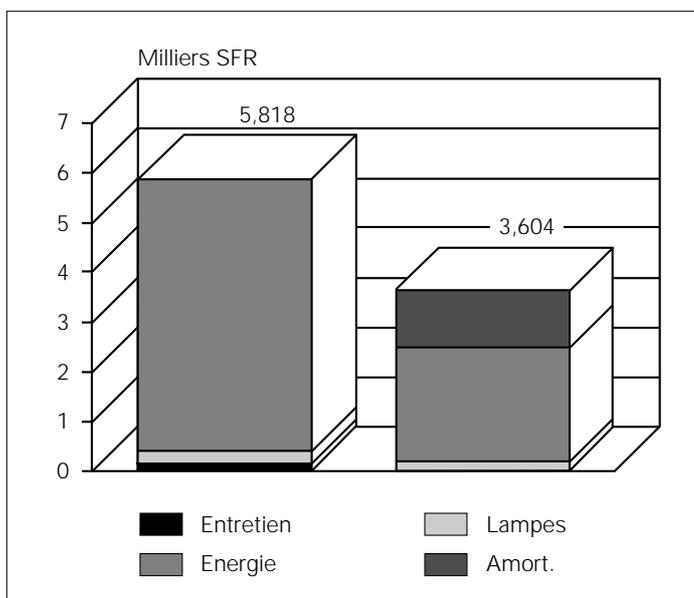


Fig. 1.5 : Comparaison des dépenses annuelles des deux installations (amortissement compris).

Les coûts d'exploitation annuels de l'installation sont ramenés de Fr. 5'800.- à Fr. 2'300.-. Le temps de retour de l'investissement, lié à la rénovation, est de 3 ans. Ces performances économiques sont réalisées simultanément à une amélioration des prestations (éclairage, rendu des couleurs).

## 1.4 AMÉLIORATION DES CONDITIONS DE TRAVAIL

La rénovation d'une installation d'éclairage ne permet pas uniquement de réduire la consommation d'énergie. Elle permet aussi d'améliorer la sécurité et le bien-être des travailleurs, ce qui se traduit généralement par une augmentation de la productivité. L'exemple suivant montre le cas d'un atelier de dévidage dans une fabrique de fil à coudre.

Un essai de plusieurs mois, portant sur différentes variantes d'éclairage, a permis de constater dans ce dernier une importante augmentation de la productivité.

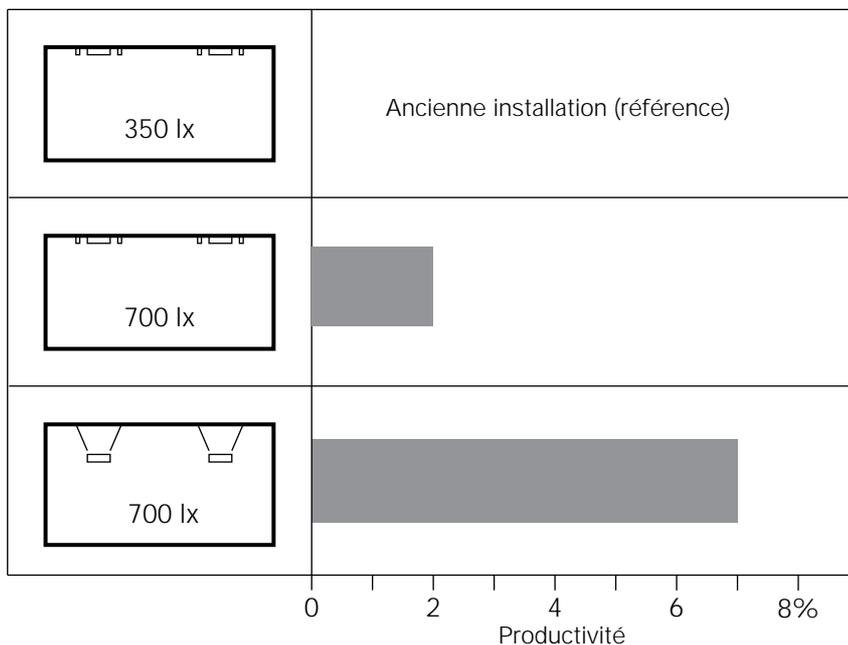


Fig. 1.6 : Amélioration des conditions de travail et de la productivité par l'éclairage.

L'éclairage initial, composé de tubes fluorescents dépourvus de grilles paralumes (tube nu), produisait un éclairage moyen de 350 lx. Avec une première variante, on a doublé cet éclairage tout en conservant le même type de luminaire. Avec une deuxième variante, on a augmenté l'éclairage au moyen d'un éclairage indirect, ce qui a eu par ailleurs pour résultat d'améliorer la qualité de l'éclairage (atténuation de l'éblouissement, contrastes de luminance modérés).

La productivité a été évaluée sur la base de la quantité de fil produite quotidiennement par les équipes de travail. La figure 1.6 montre les résultats obtenus.

En augmentant simplement l'éclairage par rapport à l'installation initiale, un accroissement de productivité de 2 % a été observé. La seconde variante a permis, en revanche, une augmentation significative de productivité de l'ordre de 7 %.

### Observation

Une augmentation de productivité de 1 % est en général suffisante pour compenser le surcoût annuel occasionné par l'amélioration d'une installation d'éclairage.



Fig. 1.7 : Illustration d'un atelier de production de fil après rénovation de l'installation d'éclairage (éclairage indirect).



<b>2. CARACTÉRISTIQUES DU PROJET D'ÉCLAIRAGE</b>	<b>21</b>
■ 2.1 Aspects énergétiques	23
■ 2.2 Aspects ergonomiques	24
■ 2.3 Evaluation globale du projet	26
■ 2.4 Stratégie globale du projet	31
■ 2.5 Modes d'éclairage artificiel	32
■ 2.6 Tâches visuelles astreignantes	32
■ 2.7 Commande de l'éclairage	37
■ 2.8 Influence de la couleur	39
■ 2.9 Réalisation exemplaire	39



## 2. CARACTERISTIQUES DU PROJET D'ÉCLAIRAGE

### 2.1 ASPECTS ÉNERGÉTIQUES

Si l'on veut réduire la consommation d'énergie d'une installation d'éclairage, il ne suffit pas d'obtenir un niveau d'éclairement maximal à l'aide d'un minimum d'énergie. Il faut prendre en compte tout un ensemble de paramètres, qui caractérisent les performances de cette installation dans l'environnement industriel. Ces paramètres comprennent :

- des critères ergonomiques ;
- des aspects liés à la sécurité ;
- des critères économiques.

L'objectif fixé consiste donc à satisfaire ces critères (productivité et sécurité maximales, bien-être des usagers, coûts modérés, etc.), moyennant une consommation d'énergie aussi faible que possible.

L'évaluation d'installations existantes ne peut, de la même manière, pas se limiter à une pure analyse des niveaux d'éclairement ; celui-ci ne reflète pas à lui seul la qualité de l'installation d'éclairage, appréciée sur la base des critères mentionnés plus haut. Un abaissement drastique du niveau d'éclairement influence à la fois le bien-être des usagers et leur capacité de production ; cela peut se traduire par des problèmes psychologiques (fatigue générale, démotivation) ou des atteintes physiques (fatigue oculaire, maux de tête).

Des mesures d'économie d'énergie en matière d'éclairage se doivent donc de tenir compte de l'ensemble des critères d'appréciation propres à l'industrie.

L'encadré suivant résume les principaux objectifs du projet d'éclairage qui découlent de ces critères.

#### **Objectifs du projet d'éclairage**

L'objectif du projet d'éclairage consiste à satisfaire les critères suivants :

- bien-être des usagers ;
- productivité élevée ;
- sécurité maximale ;
- investissement raisonnable ;
- coûts d'exploitation modérés.

Cela doit être réalisé au moyen d'installations consommant une quantité d'énergie aussi faible que possible.



## 2.2 ASPECTS ERGONOMIQUES

La relation existant entre l'éclairage d'une tâche (travail à effectuer) et la performance visuelle atteinte (productivité des travailleurs) a fait l'objet d'études dans les années 1950-1960 [15, 18].

L'objectif de l'ergonomie visuelle est d'adapter les tâches visuelles, par l'intermédiaire de l'éclairage en particulier, aux personnes concernées (travailleurs). Cela signifie plus précisément :

- garantir l'absence de risques au travail ;
- optimiser l'efficacité au travail (table, cadran, panneaux, etc.);
- assurer un confort visuel approprié.

Les tâches industrielles sont de nature très variée. Elles se distinguent par :

- le poste de travail (fixe, mobile, debout, etc.) ;
- l'étendue du champ de travail (table, cadran, panneaux, etc.);
- la taille des objets à percevoir (cadrans, leviers, etc.) ;
- les caractéristiques du local (atelier, hangar, hall, etc.).

La facilité à exécuter une tâche visuelle est fonction des conditions d'éclairage de cette dernière. Celle-ci dépend de la manière dont la lumière interagit avec les objets qui composent la tâche. La lumière se caractérise ainsi par les propriétés suivantes :

- elle fait apparaître les objets et leur position dans l'espace de travail ;
- elle véhicule des informations utiles sur la quantité des objets produits et sur l'état des outils et machines ;
- elle permet de transmettre des signaux opératoires codés, analogiques ou alphanumériques.

La perception visuelle dépend toutefois de mécanismes précis, illustrés à la figure 2.1.

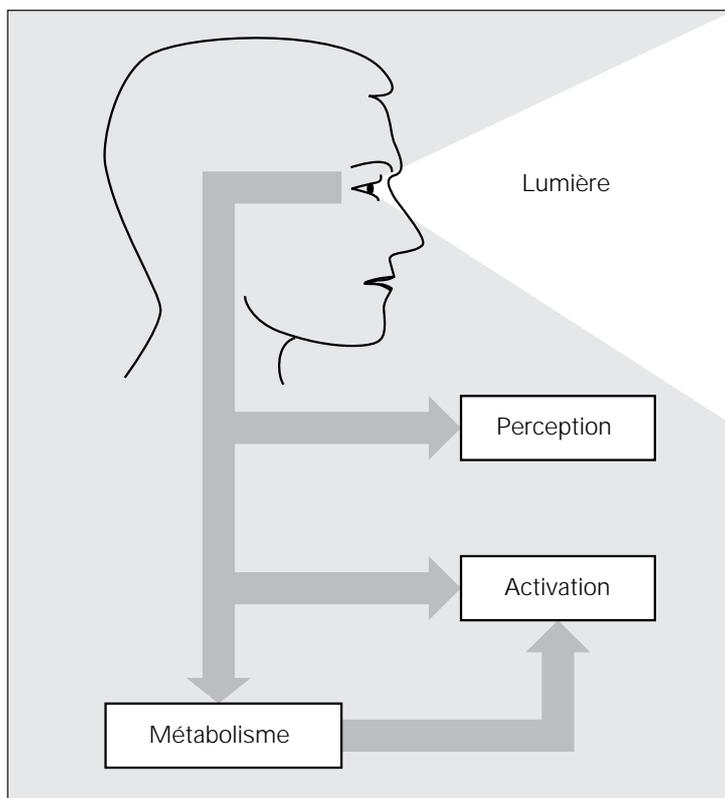


Fig. 2.1 : Influence de la lumière sur le métabolisme et l'activité des personnes.



Les mécanismes de perception visuelle sont dépendants de plusieurs muscles oculaires. En cas de sollicitation exagérée de ces derniers, ceux-ci se fatiguent comme tout autre muscle. Une fatigue des muscles oculaires ne reste cependant pas limitée à ceux-ci, elle se transmet également aux muscles voisins. On ne ressent donc généralement pas une fatigue visuelle comme telle, mais comme une fatigue corporelle générale. Si l'on ne prête pas suffisamment attention à celle-ci, autrement dit, si l'on ne veille pas à la détente nécessaire, des maux de tête, de la nervosité et d'autres troubles peuvent faire leur apparition. Cela se traduit, le plus souvent, par une baisse quantitative et qualitative de la capacité de travail ; un fort absentéisme et des accidents de travail en sont généralement les conséquences.

Les principales causes de la fatigue visuelle sont les suivantes :

- contrastes de luminance excessifs (éblouissement) ;
- contrastes chromatiques insuffisants (difficulté à distinguer les objets) ;
- dichroïsme spectral des sources (accommodation alternative de la vision sur les bandes verte et rouge).

L'éclairage influence la productivité du travail, quel que soit le type d'activité considérée, même si celle-ci n'est pas directement dépendante de la perception visuelle (frappe à l'aveugle). On a démontré, par exemple [18] dans le cas d'un travail de dactylographie, que les erreurs de frappe diminuent lorsque le niveau d'éclairement augmente (voir figure 2.2), même si le texte n'est pas saisi à partir d'un document, mais à partir d'un dictaphone. En ce qui concerne les erreurs par nombre de frappes, on a enregistré pour 100 pages (2500 frappes par page) en moyenne 72 erreurs de moins avec un éclairement de 650 lx qu'avec un éclairement de 200 lx. Pour des niveaux d'éclairement supérieurs, la vitesse de frappe est en outre plus régulière.

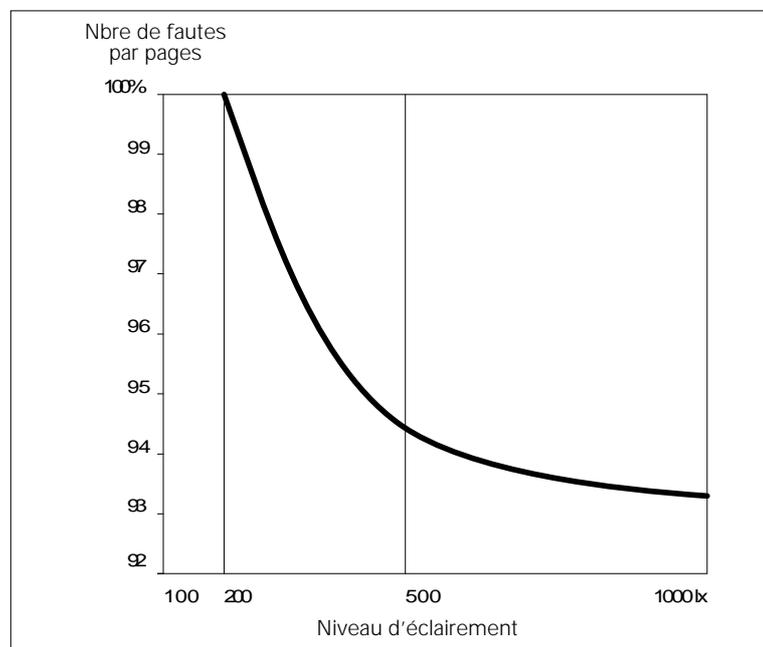


Fig. 2.2 : Influence du niveau d'éclairement sur le nombre d'erreurs de frappe en dactylographie.

Cette affirmation est apparemment en contradiction avec l'approche qui consiste à abaisser le niveau d'éclairement général en vue d'économies d'énergie. On rappellera toutefois qu'un éclairement approprié est nécessaire à l'endroit où l'on effectue une tâche (éclairage à la tâche par ex.) ; ce dernier peut être relativement faible (100 Lux) dans les zones où aucune tâche visuelle astreignante n'est prévue (zones de circulation par exemple).



L'encadré suivant donne, à titre indicatif, les valeurs d'éclairage appropriées à différentes activités industrielles. Des valeurs détaillées de ces éclairages pour d'autres types d'activités sont données à la référence [5].

Valeurs d'éclairage pour différentes activités industrielles		
Industrie alimentaire		150 - 500 Lx
Mécanique générale	grands objets	300 Lx
	petits objets	2'000 Lx
Industrie du bois		300 - 500 Lx
Industrie du verre		150 - 500 Lx
Salles de contrôle		500 Lx
Laboratoires		500 Lx
Salles de cours		300 Lx
Salles de lecture		500 Lx

Un éclairage excessif peut conduire à des résultats négatifs, en raison d'éventuels éblouissements induits par le système d'éclairage.

### Règle importante

En cas d'étude ou de rénovation d'installation d'éclairage, il faut toujours tenir compte de la répartition des luminances dans le champ visuel. Les contrastes de luminance doivent être inférieurs à :

- trois dans l'ergorama (champ central de  $2 \times 30^\circ$ ) ;
- dix dans le panorama (champ binoculaire de  $2 \times 60^\circ$ ) ;
- quarante dans le reste du champ visuel.

Une étude ancienne [24] a montré qu'une augmentation de rendement de 1 % est généralement suffisante pour compenser la dépense annuelle occasionnée par l'amélioration d'une installation d'éclairage. Du fait des progrès technologiques sur le plan énergétique et de l'augmentation du coût de la main d'œuvre, il est vraisemblable que ces rapports d'investissement soient encore plus favorables aujourd'hui.

## 2.3 EVALUATION GLOBALE DU PROJET

Pour pouvoir intégrer l'ensemble des exigences mentionnées précédemment au projet d'éclairage, il est en général nécessaire de consentir à des investissements supplémentaires en étude et en frais de planification. On ne procédera toutefois ainsi, que si l'opération s'avère rentable.

L'influence de la lumière sur l'homme, les relations existant entre celle-ci, les mécanismes de perception visuelle et son comportement sont de nature complexe. Il n'est donc pas suffisant de comparer et d'éva-



luer différentes variantes de projets d'éclairage, uniquement sur la base de l'éclairage offert par ces derniers, de leur coût ou de leur puissance spécifique. Une méthode intégrant tous ces différents aspects est nécessaire.

Une grande partie des exigences requises pour réaliser un éclairage globalement satisfaisant ne peut être décrite que qualitativement, et n'est donc pas quantifiable mathématiquement lors de l'étude du projet. Pour évaluer néanmoins de façon objective les différentes variantes et les comparer entre elles, il est recommandé d'avoir recours à l'analyse de la valeur utile.

L'analyse de la valeur utile permet de déterminer quelle variante fournit finalement les meilleures prestations. On définit tout d'abord à cet effet les critères déterminants pour évaluer l'installation d'éclairage. Il est indiqué de classer ces critères par ordre hiérarchique ; on définit en l'occurrence des critères clefs, que l'on détaille en critères partiels, qui permettront d'évaluer, aussi objectivement que possible, les différentes variantes du projet.

On veillera à trois conditions préalables :

- Il faut tenir compte de tous les critères importants.
- Il ne faut pas utiliser, dans une première étape, des critères relatifs aux coûts.
- Il faut s'assurer de l'indépendance des différents critères.

Le déroulement d'une telle analyse est présenté à la table suivante sur la base de l'évaluation des trois variantes de rénovation de l'éclairage d'une halle (paragraphe 1.1).

Critère d'évaluation	Système d'éclairage							
			Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	PON	%	DS	VU	DS	VU	DS	VU
<b>Vision</b>								
Eblouissement direct	4	11	4	44	3	33	5	55
Réflexions, brillances	5	14	2	28	3	42	1,5	21
Ombres	3	9	3	27	4	36	4	36
Température de couleur, rendu des couleurs	2	6	3	18	3	18	2	12
<b>Confort</b>								
Répartition des luminances	2	6	3	18	4	24	1	6
Perturbation par défaillance d'une lampe	3	9	4	32	4	36	2	18
Enclenchement et réallumage	2	6	4	24	4	24	2,5	15
<b>Esthétique</b>								
Apparence des luminaires	1	3	3	9	2	6	4	12
<b>Exploitation</b>								
Efficacité lumineuse	4	11	4	44	4	44	3,5	38,5
Durée de vie	3	8	4	32	4	32	4	32
Facilité de maintenance	3	9	2	18	2	18	2,5	22,5
Nombre de lampes	3	8	4	32	4	32	5	40
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>100</b>		<b>326</b>		<b>345</b>		<b>308</b>

PON : facteur de pondération  
 DS : degré de satisfaction  
 VU : valeur utile

$$VU = PON [\%] \times DS$$

Table 2.1 : Méthode d'évaluation globale du projet d'éclairage (analyse de la valeur utile).



Dans cette table figure en première colonne la classification des critères spécifiques. Celle-ci contient les critères clefs (en caractères gras) permettant de qualifier un éclairage au poste de travail. Ces critères sont ventilés afin de pouvoir mieux être évalués. Cette classification est trop grossière pour une application pratique ; elle a volontairement été simplifiée pour des raisons didactiques.

Comme les différents critères n'ont pas tous la même importance en ce qui concerne la qualité de l'installation, il convient de les pondérer avant d'évaluer ces différents aspects. La manière la plus simple de procéder consiste à utiliser une échelle de pondération, comme celle donnée à la table suivante :

<b>Importance du critère</b>	<b>Facteur de pondération</b>
pas important	1
peu important	2
important	3
très important	4
extrêmement important	5

Table 2.2 : Facteur d'importance des critères d'évaluation.

La somme de tous les facteurs de pondération doit être égale à 100 % ; chaque facteur est donc normalisé à partir du total initial (2<sup>e</sup> colonne de la table 2.1). On obtient ainsi pour la première ligne :

$$4 \times \frac{100}{35} = 11 \%$$

On examine ensuite dans quelle mesure les différentes variantes du projet satisfont aux différents critères. A cet effet, on définit tout d'abord une échelle de degré de satisfaction. L'échelle suivante, comprenant 6 degrés, a en l'occurrence, parfaitement fait ses preuves. A l'aide de cette échelle, on établit une correspondance pour chaque critère entre une description relative à celui-ci et les différents degrés de satisfaction. La table 2.4 illustre cela pour les cas traités précédemment.

<b>Condition</b>	<b>Degré de satisfaction</b>
insatisfaite	0
mal satisfaite	1
insuffisamment satisfaite	2
suffisamment satisfaite	3
bien satisfaite	4
parfaitement satisfaite	5

Table 2.3 : Degré de satisfaction des critères d'évaluation.

Avant d'entreprendre l'évaluation du projet, on déterminera tout d'abord les critères qui doivent absolument être satisfaits, c'est-à-dire ceux qui doivent en tout cas atteindre le degré de satisfaction 3. On peut alors déjà éliminer les variantes qui ne satisfont pas cela, ce qui évite du travail inutile. Le degré de satisfaction est déterminé pour chaque variante à partir de la table suivante.



Critères	Degré de satisfaction					
	0	1	2	3	4	5
<b>Vision</b> Eblouissement direct	Insupportable.	Luminance des luminaires au-dessus de $60^\circ > 50'000 \text{ cd/m}^2$	Génant. Luminance des luminaires au-dessus de $60^\circ > 2'000 \text{ cd/m}^2$	Limitation de l'éblouissement, selon classe de qualité 3	Limitation de l'éblouissement, selon classe de qualité 2	Limitation de l'éblouissement, selon classe de qualité 1 Pas de flux lumineux au-dessus de $50^\circ$
Réflexions, brillances	Les reflets et brillances sont insupportables. La perception visuelle est impossible.	Les reflets et brillances sont intenses. Possibilité de les éviter en partie en modifiant l'angle de vision.	Les reflets et brillances sont intenses, mais localisés. Possibilité de les éviter en modifiant l'angle de vision.	Reflets et brillances atténués pouvant perturber le travail.	Reflets et brillances de grande surface, mais à faible luminance, perturbant faiblement la perception visuelle.	Aucune perturbation par des reflets et brillances.
Ombres	Ombres très marquées. Les détails ne sont pas perceptibles dans les zones d'ombre.	Ombres marquées. Les détails ne sont guère perceptibles dans les zones d'ombre.	Ombres assez marquées. Les petits détails ne sont pas perceptibles dans les zones d'ombre.			Rapport équilibré entre la lumière directe et la lumière diffuse. Les structures et les formes paraissent naturelles.
Température de couleur, rendu des couleurs	Température et rendu des couleurs inacceptables	Température de couleur défavorable, indice de rendu des couleurs $< 40$	Température de couleur partiellement appropriée, indice de rendu des couleurs $< 70$	Température de couleur généralement appropriée, indice de rendu des couleurs $< 90$		Température de couleur appropriée, indice de rendu des couleurs $\geq 90$
<b>Confort</b> Distribution de luminance dans le local	Contraste de luminances insupportables dans le champ visuel. $E_z/E_h < 0,15$	Très grand contraste de luminances dans le champ visuel. $E_z/E_h < 0,2$	Grand contraste de luminances dans le champ visuel. $E_z/E_h < 0,25$	Contraste de luminances marqué dans le champ visuel, surtout en vision horizontale		Luminances équilibrées. Effet spatial naturel. $E_z/E_h > 0,45$
Perturbation par défaillance d'une lampe	Inacceptable.	Très importante.	Importante.	Faible.	Très faible.	Nulle.
Enclenchement et réallumage		Temps d'enclenchement élevé. Temps de refroidissement très long.		Temps d'enclenchement moyen. Temps de refroidissement modéré.		Pas de période de refroidissement. Réallumage instantané.
<b>Esthétique</b> Apparence des luminaires	Les luminaires dominent l'espace.		Les luminaires accentuent l'espace.	Les luminaires influencent l'espace.		Pas d'influence sur l'espace.
<b>Exploitation</b> Efficacité lumineuse	$< 10 \text{ lm/W}$	$< 20 \text{ lm/W}$	$< 40 \text{ lm/W}$	$< 70 \text{ lm/W}$	$< 90 \text{ lm/W}$	$\geq 90 \text{ lm/W}$
Durée de vie des sources	$< 1'000 \text{ h}$	$\geq 1'000 \text{ h}$	$\geq 2'000 \text{ h}$	$\geq 4'000 \text{ h}$	$\geq 8'000 \text{ h}$	$\geq 16'000 \text{ h}$
Facilité de maintenance		Mauvaise accessibilité. Echafaudages indispensables. Sources difficiles à manier.	Accessibilité problématique. Grande échelle indispensable.	Petite échelle. Remplacement des sources possible uniquement avec un outillage approprié.	Escabeau. Pas d'outillage nécessaire.	Remplacement des sources possible sans échelle et sans outillage.
Nombre de sources par dizaine de $\text{m}^2$ de surface éclairée	$> 16$	$\geq 16$	$\leq 8$	$\leq 4$	$\leq 2$	$< 1$

Table 2.4 : Détermination du degré de satisfaction.



La table 2.5 résume les appréciations données à chaque variante, ainsi que les degrés de satisfaction atteints.

Critères d'évaluation	Dispositif d'éclairage		
	Variante 1	Variante 2	Variante 3
<b>Vision</b> Eblouissement direct	Perpendiculairement à l'axe du tube fluorescent, le luminaire est bien protégé par un réflecteur à faisceau intensif. DS = 4. Dans l'axe longitudinal du tube fluorescent, la limitation contre l'éblouissement correspond à la classe de qualité 3. Degré moyen de satisfaction : DS = 3,5	Selon les deux axes, le luminaire muni d'un réflecteur blanc correspond approximativement à la classe de qualité 3. DS = 3	Le luminaire se distingue par une répartition assez intensive. La limitation de l'éblouissement correspond approximativement à la classe de qualité 1. DS = 4
Reflets, brillances	Du fait du réflecteur, la luminance est assez élevée dans la zone d'émission du flux. DS = 2	Avec un réflecteur blanc, la luminance des reflets sur le plan de travail sont plus faibles qu'avec un réflecteur. DS = 3	Les lampes à haute pression ont une luminance très élevée, le réflecteur aussi. Les réflexions sont par conséquent de luminance élevée, mais localisées. DS = 1,5
Ombres	Perpendiculairement à l'axe du tube, le flux lumineux est fortement focalisé, il ne l'est pas dans le plan longitudinal. Globalement, l'ombre produite est modérée. DS = 3	La distribution du flux lumineux a lieu selon tous les axes ; les ombres sont relativement douces. DS = 4	Le réflecteur assure une répartition intensive du flux lumineux dans toutes les directions ; les ombres sont bien marquées. DS = 2
Température de couleur, rendu des couleurs	Température de couleur appropriée, indice de rendu des couleurs de l'ordre de 85. DS = 3	Comme variante 1	Teinte de la lumière jaunâtre. Indice de rendu des couleurs de l'ordre de 60. DS = 2
<b>Confort</b> Distribution des luminances dans le local	Eclairage cylindrique (= éclairage vertical moyen) $E_z = 0,31 \cdot E_h$ , DS = 3	Eclairage cylindrique (= éclairage vertical moyen) $E_z = 0,43 \cdot E_h$ , DS = 4	Eclairage cylindrique (= éclairage vertical moyen) $E_z = 0,17 \cdot E_h$ , DS = 1
Perturbation par défaillance d'une lampe	Etant donné le grand nombre de lampes, la défaillance de l'une d'elles ne se remarque presque pas. DS = 4	Comme variante 1	Etant donné le flux lumineux important de chaque lampe, l'écartement des luminaires est important. La défaillance d'une lampe se remarque donc facilement. DS = 2
Enclenchement et réallumage	Les tubes fluorescents s'allument en quelques secondes. Le flux lumineux initial est proche de la valeur finale. DS = 4	Comme variante 1	La lampe s'allume en quelques secondes. Le flux lumineux initial est inférieur à 10 % ; le temps de démarrage est d'environ 5 minutes. Après déclenchement, la lampe ne peut être rallumée qu'après une minute environ. DS = 2,5
<b>Esthétique</b> Apparence des luminaires	La répartition du flux le long de l'axe longitudinal étant intensive, les luminaires n'affectent pas le sentiment de spatialité ressenti lorsqu'ils sont allumés. DS = 3	Les luminaires sont bien visibles dans toutes les directions et accentuent le sentiment de spatialité. DS = 2	Les luminaires sont relativement compacts et bien protégés de tous côtés. Ils n'ont qu'une faible influence sur le sentiment de spatialité. DS = 4
<b>Exploitation</b> Efficacité lumineuse	env. 84 lm/W DS = 4	Comme variante 1	env. 80 lm/W DS = 3,5
Durée de vie des sources	env. 12'000 h à raison de 3 h d'allumage par enclenchement DS = 4	Comme variante 1	Comme variante 1
Facilité de maintenance	En l'absence d'un pont roulant, l'accessibilité est problématique. DS = 2	Comme variante 1	Comme variante 1 ; le luminaire étant compact et le culot à vis, le remplacement des sources est toutefois plus facile. DS = 2,5
Nombre de lampes par dizaine de m <sup>2</sup> de surface éclairée	1,45 DS = 2	Comme variante 1	0,05 DS = 1

Table 2.5 : Appréciation des différentes variantes de la rénovation de l'éclairage d'une halle industrielle (paragraphe 1.1).

La valeur utile de chaque critère d'appréciation n'est autre que le produit du facteur de pondération et du degré de satisfaction obtenu. Dans notre exemple, les différentes valeurs utiles calculées figurent dans les colonnes VU. Il s'agit en l'occurrence de valeurs abstraites, dont la somme correspond à la valeur utile totale de la variante. Cette somme



n'a aucune signification directe ; elle prend tout son importance lors de la comparaison avec d'autres variantes (valeur relative).

Il ressort de notre exemple, que la variante 2 est la plus favorable, quand bien même elle ne figure qu'au second rang en ce qui concerne la puissance de raccordement. On observera, toutefois, qu'elle permet de réduire de près de 40 % cette dernière par rapport à l'ancienne installation.

Il n'est pas toujours possible d'établir des critères d'appréciation clairs et précis : l'évaluation d'un projet est donc souvent affaire de jugement et d'expérience. Cela nécessite un certain savoir-faire, qui ne peut être matérialisé que par la constitution d'une équipe de travail, comprenant toutes les personnes concernées par le projet. Il est, par ailleurs, vivement recommandé de procéder aux différentes pondérations et appréciations des différents critères sans avoir connaissance des soumissions, de façon à exercer un jugement aussi neutre que possible.

Si cet exercice fait surgir des divergences d'opinion qui ne peuvent être aplanies par la discussion, on procédera alors à une étude de sensibilité. Cela revient en fait à faire varier les pondérations et évaluations contestées, de façon à examiner leur influence sur la valeur utile totale.

L'analyse de la valeur utile peut également s'appliquer à d'autres domaines [25].

## 2.4 STRATÉGIE GLOBALE DU PROJET

Le choix du mode d'éclairage influe considérablement sur la consommation d'énergie, notamment pour les bâtiments industriels. Il y a, par ailleurs, si l'on n'y prend pas garde, un risque sérieux de porter préjudice à la qualité de l'éclairage.

### **Economies d'énergie - options principales**

Il y a deux approches principales pour réaliser des économies d'énergie :

- améliorer le pouvoir de réflexion des surfaces du local, afin d'augmenter le facteur d'utilisation de l'éclairage ;
- optimiser l'apport de lumière au poste de travail, tout en évitant les prestations inutiles dans le reste du bâtiment.

### **■ Facteur d'utilisation du local**

Le facteur d'utilisation du local indique quelle part du flux lumineux émis par les luminaires atteint le plan utile (en règle générale le plan de travail horizontal situé à 80 cm du sol). La grandeur de référence est, en l'occurrence, l'éclairement moyen sur ce plan (mesuré en Lux).

Plus le facteur d'utilisation est important, plus grande est la part du flux lumineux qui atteint le plan de travail. A éclairement constant sur ce dernier, cela signifie que l'on peut réduire le flux lumineux émis par les luminaires, et par là leur consommation d'énergie.



## Amélioration du facteur d'utilisation

Le facteur d'utilisation du local est d'autant plus grand et par conséquent la consommation d'énergie d'autant plus faible que :

- la surface du local est importante ;
- sa hauteur est faible ;
- le facteur de réflexion des surfaces du local est élevé ;
- la distribution de la lumière émise par les luminaires est directe (pas de réflexions sur le plafond).

Les dimensions du local étant fixées, les mesures d'économie d'énergie se limitent généralement au choix de l'installation d'éclairage artificiel (sources, luminaires et commande) et de la couleur du revêtement des surfaces. La logique veut que l'on opte pour des luminaires à répartition intensive qui dirigent le flux lumineux sur le poste de travail ; cette approche a malheureusement pour conséquence d'assombrir plafonds et parois, ce qui est souvent ressenti de façon négative par les usagers.

La voie la plus efficace pour réduire la consommation d'énergie consiste donc, essentiellement, à augmenter le pouvoir de réflexion des surfaces du local, en traitant ces dernières avec des couleurs claires et mates. L'adéquation de l'éclairage aux contraintes ergonomiques du poste de travail demeure toutefois indispensable ; elle est compatible avec une approche du type "éclairage à la tâche", qui se traduit généralement par une consommation réduite d'énergie (pas de prestations inutiles).

En ce qui concerne la rénovation d'installations anciennes, on retiendra la règle exprimée dans l'encadré suivant :

## Rénovation et consommation d'énergie

Les installations anciennes (d'âge compris entre 10 et 15 ans) peuvent être rénovées aujourd'hui de façon à les rendre compatibles avec les exigences actuelles, tout en diminuant leur puissance de raccordement de 2/3 ; à même exploitation, les économies qui en résultent sont de l'ordre de 60 %.

Ces avantages s'ajoutent au fait qu'une rénovation permet généralement d'améliorer la sécurité au travail, le confort des usagers, ainsi que leur productivité.

## 2.5 MODES D'ÉCLAIRAGE ARTIFICIEL

On distingue trois modes principaux d'éclairage artificiel dans le domaine industriel, ceux-ci étant souvent combinés dans la pratique :

- l'éclairage général ;
- l'éclairage orienté vers les places de travail ;
- l'éclairage à la tâche.



Comme dans la plupart des autres domaines (bureaux, surfaces de vente), trois techniques d'éclairage permettent de réaliser ces modes. L'encadré suivant résume ces derniers et présente leurs avantages et inconvénients dans l'industrie.

## ECLAIRAGE DIRECT

### Propriétés

- 90 à 100 % du flux dirigé vers le bas.
- Convient à des ateliers hauts de plafond.
- Doit être généralement associé à des sources ponctuelles.

### Avantages

- Peu influencé par les facteurs de réflexion du plafond et des parois.
- Donne des ombres nettes (parfois trop accusées).
- Plus efficace sur le plan énergétique.

### Inconvénients

- Sensible au facteur de réflexion du sol.
- Risque de reflets et de brillances.
- Assombrit les plafonds.

## ECLAIRAGE DIRECT/INDIRECT

### Propriétés

- Flux reparti vers le haut et vers le bas.
- Convient à des ateliers de faible hauteur de plafond.

### Avantages

- Adoucit les ombres.
- Pas de contrastes fatiguants.

### Inconvénients

- Nécessite des parois de couleur claire.
- Moins efficace sur le plan énergétique.

## ECLAIRAGE INDIRECT

### Propriétés

- 90 à 100 % du flux dirigé vers le haut.
- Convient à des ateliers bas de plafond.

### Avantages

- Pas de contrastes fatiguants.
- Absence de reflets et de brillances.



### Inconvénients

- Nécessite des parois de couleur claire.
- Nécessite de sources d'éclairage ponctuelles (lampadaires).
- Moins efficace sur le plan énergétique.

Les figures 2.3 et 2.4 illustrent respectivement un éclairage général direct et direct/indirect (réflexion dans le luminaire). Un éclairage de type indirect est représenté à la figure 1.7.

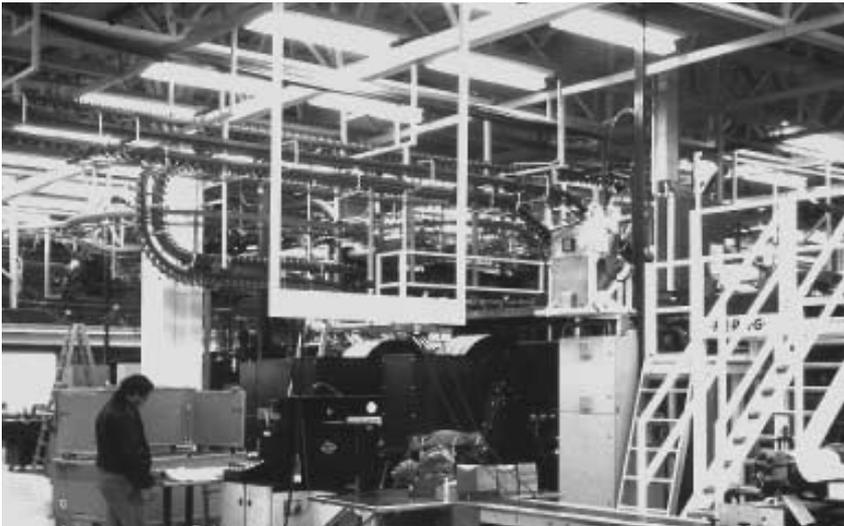


Fig. 2.3 : Eclairage direct d'une halle de production.



Fig. 2.4 : Eclairage direct/indirect intégré dans les luminaires.



## ■ Eclairage général

Un éclairage général doit en principe être prévu pour tout local de travail nécessitant un éclairage uniforme, indépendamment de son ameublement et de l'emplacement des places de travail.

L'éclairage général fournit donc des prestations identiques dans tout le local. Il se caractérise par le fait que :

- les postes de travail peuvent être disposés sur toute sa surface sans inconvénients ;
- les conditions d'installation d'un nouvel équipement de production sont favorables ;
- sa maintenance est aisée.

Le niveau d'éclairage minimal, délivré par le système d'éclairage, doit correspondre aux exigences extrêmes requises, et cela dans l'ensemble du local. Cette contrainte a malheureusement pour conséquence d'accroître inutilement la consommation d'énergie de l'installation.

## ■ Eclairage orienté vers les places de travail

L'éclairage, orienté vers les places de travail, a pour avantage d'éclairer de façon appropriée tous les postes de travail. La disposition des luminaires est toutefois subordonnée à l'emplacement de ces derniers : l'éclairage se trouve donc principalement localisé dans la zone de travail.

Avec ce mode d'éclairage, on évite les inconvénients de l'éclairage général et économise ainsi de l'énergie : un niveau plus faible d'éclairage suffit normalement pour les zones de circulation. Le désavantage de ce dernier réside dans une moins grande flexibilité, quant à l'usage de la surface. Cet inconvénient peut être atténué en utilisant :

- des luminaires sur lampadaires mobiles ;
- des luminaires en ligne montés sur rail ;
- des luminaires suspendus à câble d'alimentation souple.

## ■ Eclairage à la tâche

L'éclairage à la tâche, en complément d'un éclairage général, est indiqué lorsque des travaux spéciaux ou des tâches visuelles particulièrement exigeantes sont prévues. Cela est aussi indiqué, lorsque des personnes d'un certain âge ou souffrant d'un déficit d'acuité visuelle occupent les postes de travail. Ces dernières doivent bénéficier d'un niveau d'éclairage supérieur : on rappellera que le niveau d'éclairage requis à 60 ans est 10 fois supérieur à celui de 20 ans.

La figure 2.5 illustre ce mode d'éclairage dans un cas extrême (utilisation de fibres optiques). Pour l'éclairage à la tâche on recommande de maintenir un certain équilibre entre l'éclairage au poste de travail et l'éclairage général ( $E_{\text{général}} = 3 \sqrt{E_{\text{tâche}}}$ ).



Fig. 2.5 : Eclairage à la tâche particulier.

## 2.6 TACHES VISUELLES ASTREIGNANTES

Pour de nombreuses activités industrielles, seul un éclairage à la tâche permet de répondre aux exigences requises en matière d'acuité visuelle [28-31]. Dans de pareils cas, il est nécessaire d'installer des luminaires spéciaux, présentant des caractéristiques spécifiques du point de vue de la focalisation de la lumière, de la température et du rendu des couleurs.

Les références bibliographiques [2], [5], [19] et [20] indiquent à ce sujet une multitude de solutions appropriées aux places de travail les plus diverses.

L'exemple suivant, illustrant un poste de contrôle de qualité, montre comment une installation d'éclairage permet de faciliter une tâche visuelle spécifique.

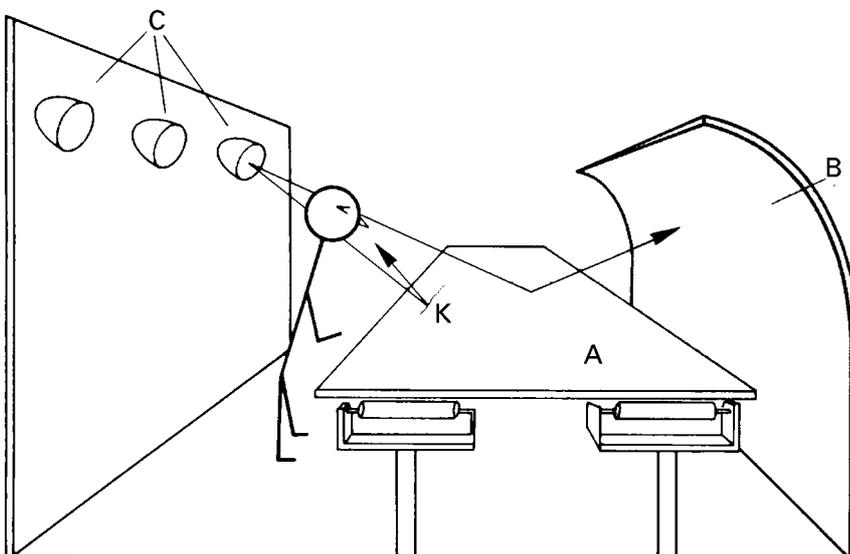


Fig. 2.6 : Eclairage approprié au contrôle de qualité des tôles polies.



La détection d'imperfections, lors du contrôle de qualité, requiert des contrastes de luminance très élevés (cf. document "Éléments d'éclairagisme"). C'est le cas, en particulier, pour le contrôle des tôles polies. On rappellera, à ce propos, que l'acuité visuelle est favorisée par des contrastes élevés entre l'objet à observer et son support (fond). La luminance du fond conditionne, par ailleurs, l'adaptation de l'œil : elle influence le niveau d'éclairage pupillaire.

Grâce au dispositif de la figure 2.6, la tôle (A) apparaît sombre, la contre-paroi (B) se reflétant dans celle-ci. Une rayure (K) reflète par contre la lumière provenant des luminaires (C) et apparaît ainsi plus visible à l'œil.

Les exigences requises pour aménager une place de travail sont aussi variées que les activités pouvant s'y exercer. Afin de parvenir à une utilisation de l'énergie aussi efficace que possible, il est toutefois recommandé de faire appel à des sources et des luminaires performants. Cela est d'autant plus nécessaire que l'éclairage requis est élevé. Dans le cas d'objets de très petites dimensions, celui-ci peut atteindre jusqu'à 3000 lx. Seul l'éclairage à la tâche peut être recommandé dans ce cas (économies d'énergie).

## 2.7 COMMANDE DE L'ÉCLAIRAGE

La mesure d'économie la plus efficace consiste à enclencher l'installation d'éclairage uniquement lorsque cela est nécessaire. Cette mesure ne coûte rien, lorsque cette opération est assurée par des collaborateurs informés et motivés, actionnant de manière appropriée des commutateurs muraux.

L'expérience a montré qu'il est possible d'arriver à des résultats concluants grâce à une campagne interne d'information, des circulaires ou un affichage hebdomadaire de la consommation d'énergie. La figure suivante montre les résultats obtenus dans une usine de fabrication de machines outils. Une campagne de motivation a permis de stabiliser, puis de réduire la consommation d'une halle industrielle (18'700 m<sup>2</sup>).

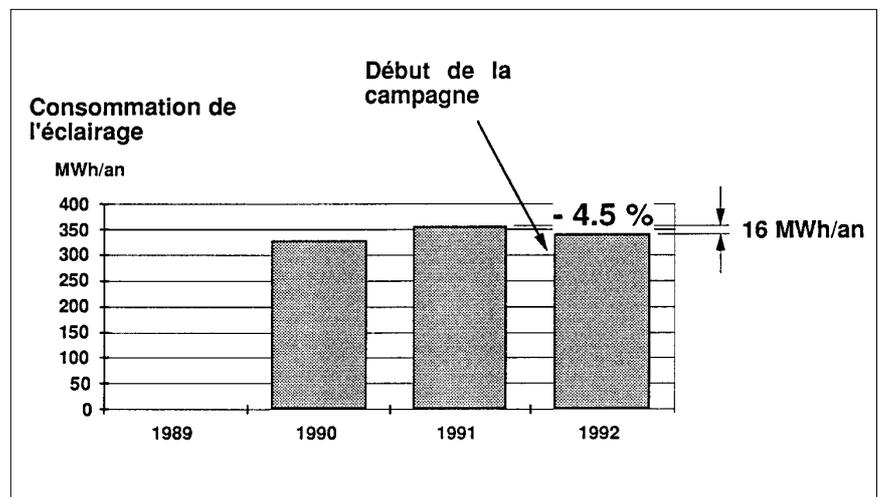


Fig. 2.7 : Influence d'une campagne de motivation sur la consommation d'électricité d'une halle industrielle.



Outre le facteur humain, il est intéressant de pouvoir enclencher et déclencher l'installation d'éclairage près des fenêtres et dans les zones de circulation (voir paragraphe 1.2).

### ■ Détecteurs de présence

Une autre mesure efficace en matière d'économie d'énergie est la commande automatique de l'éclairage en fonction de la présence de personnes. Ce genre de commande ne convient, toutefois, que pour de grandes surfaces peu fréquentées, comme des entrepôts. Dans une grande halle de stockage, l'installation de détecteurs de présence peut abaisser la consommation d'électricité pour l'éclairage d'environ 70 %. On a, par exemple, obtenu un résultat similaire dans une grande entreprise de meubles.

Selon les circonstances, l'équipement technique supplémentaire peut être important, raison pour laquelle cette mesure d'économie d'énergie ne se justifie généralement que pour de grandes installations d'éclairage.

### ■ Asservissement à l'éclairage naturel

En matière d'économie d'énergie, la commande de l'éclairage par asservissement à la lumière naturelle est encore plus efficace. Là encore, l'équipement supplémentaire peut être important ; il ne se justifie donc généralement que pour de grandes installations.

L'asservissement à la lumière naturelle peut en principe s'effectuer de trois manières différentes :

- par déclenchement/enclenchement ;
- par paliers (30 %, 60 %, 100 %) ;
- par commande continue.

Le document d'introduction "Eléments d'éclairagisme" donne un aperçu détaillé de ces modes de commande.

Les commandes par déclenchement/enclenchement et par palier sont, en général, mal perçues par les utilisateurs. La figure 2.8 illustre l'économie d'énergie substantielle, obtenue grâce à une commande par déclenchement/enclenchement asservie à la lumière du jour. Celle-ci est pourvue d'une temporisation (1 heure) et d'une possibilité de reprise en main par l'utilisateur.

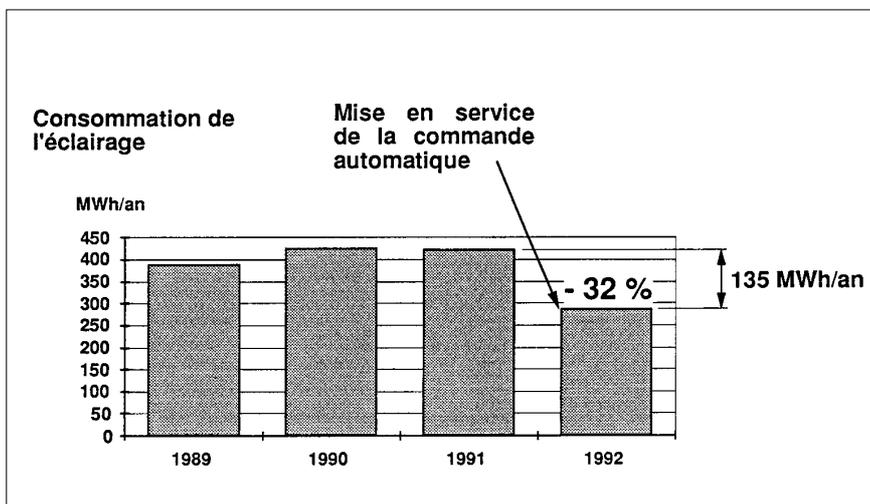


Fig. 2.8 : Influence d'une commande asservie à la lumière du jour (déclenchement/enclenchement) dans une halle industrielle (11'400 m<sup>2</sup>).



L'adaptation continue de l'éclairage artificiel au niveau d'éclairement naturel présente souvent le meilleur confort : elle n'est souvent même pas perçue par les utilisateurs.

Ce mode de commande permet, bien entendu, de réaliser de substantielles économies d'énergie.

## 2.8 INFLUENCE DE LA COULEUR

Les installations techniques du bâtiment (ventilation, éclairage) font l'objet d'une planification rigoureuse dans les bâtiments industriels ; cela n'est généralement pas le cas du choix des couleurs. Son usage adéquat est, toutefois, une condition indispensable à l'obtention de conditions de travail agréables et d'une productivité élevée.

Les objectifs justifiant particulièrement l'utilisation de la couleur dans une entreprise, sont :

- l'identification des endroits dangereux (risque d'accidents) ;
- l'utilisation de couleurs pour l'affectation et la répartition des postes de travail, des locaux et de l'outillage (orientation plus rapide) ;
- une réduction de la consommation d'électricité pour l'éclairage (meilleure réflexion de la lumière sur les surfaces claires) ;
- l'obtention d'une impression d'espace favorisant l'exécution des tâches (bien-être, productivité).

Les réserves émises en ce qui concerne les peintures de couleur, à propos de leur résistance plus faible aux salissures (frais de nettoyage supplémentaires) ont été largement démenties par les progrès techniques réalisés par les fabricants de peintures.

La configuration chromatique des halles industrielles ne constitue plus, aujourd'hui, une expérience hasardeuse. On dispose non seulement d'éléments théoriques, en ce qui concerne l'opportunité de faire appel à la couleur, mais aussi d'une expérience suffisante en ce qui concerne son influence sur le déroulement du travail [10], [11], [14].

Les couleurs saturées doivent être utilisées en priorité pour faciliter le repérage des signaux importants. Elles seront choisies en fonction de leur contraste chromatique et de leur facteur de réflexion. Le contraste chromatique dépend de la nature de la source lumineuse ; il peut évoluer notamment lors du passage de la lumière du jour à la lumière artificielle.

Les panneaux de contrôle contenant des informations analogiques (cadrons) et digitales (chiffres) doivent être situés dans un endroit dont l'éclairage peut être adapté à ces derniers.

## 2.9 RÉALISATION EXEMPLAIRE

La rénovation de l'installation d'éclairage, présentée ci-après, est particulièrement intéressante : son influence sur le bien-être des travailleurs a été évaluée [28].

## Ancienne installation

L'ancienne installation d'éclairage était initialement constituée des sources ponctuelles suivantes :

71 lampes à décharge à vapeur de mercure haute-pression (1000 W)

28 lampes à décharge au sodium basse-pression (200 W)

La longueur de la halle est de 250 m, sa largeur est de 32.5 m. Elle est munie de piliers séparés par une distance de 15 m ; les sources sont situées à une hauteur de 16 m.

Le niveau d'éclairage moyen dû à l'éclairage général est de 110 Lux. Six postes de travail (centre de tri, centre de contrôle, etc.) sont équipés d'éclairage d'appoint.

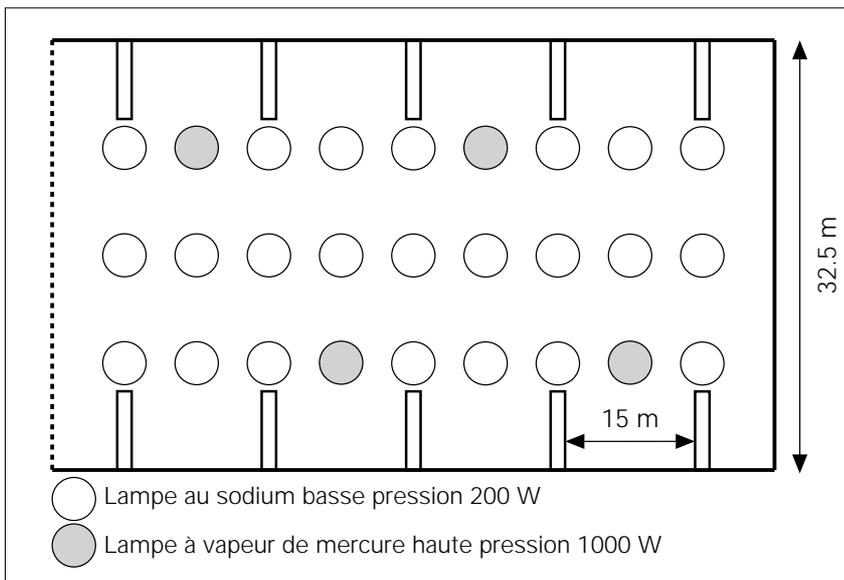


Fig. 2.9 : Ancienne installation d'éclairage

## Nouvelle installation

La halle de production a été équipée de lampes à décharge au sodium haute-pression. Celles-ci ont permis de réaliser, par rapport à l'ancienne installation, de considérables économies d'énergie.



Fig. 2.10 : Nouvelle installation d'éclairage



La table suivante montre l'efficacité lumineuse supérieure des nouvelles sources ainsi que les économies d'énergie obtenues après rénovation.

Type de source	Efficacité lumineuse [lm/W]
Lampe à vapeur de mercure 1000 W	60
Lampe à hallogénures métalliques 1000 W	90
Lampe au sodium haute pression 200 W	130

Données consommation	Ancienne installation	Nouvelle installation
Total des sources	71 x 1040 W 32 x 1080 W	28 x 240 W
Puissance de raccordement	81 kW	35 kW
Consommation énergétique	691'656 kWh	296'424 kWh
Surface éclairée	8'250 m <sup>2</sup>	8'250 m <sup>2</sup>
Eclairement	110 Lux	220 Lux
<b>Consommation relative</b>	<b>100 %</b>	<b>43 %</b>

Table 2.6 : Efficacité lumineuse des nouvelles sources.

A l'occasion de cette rénovation, c'est posé la question de savoir si l'indice de rendu des couleurs plus défavorable de ces sources avait une influence sur les conditions de travail des occupants de la halle (altération du rendu des couleurs). Afin d'éclaircir de problème, un questionnaire a été soumis aux travailleurs, alors que des mesures chromatiques étaient réalisées en collaboration avec des ergonomes et des psychologues.

Cette étude a montré que la nouvelle installation est considérée comme plus agréable que l'ancienne. L'indice de rendu des couleurs a été jugé acceptable à optimal. Aux postes de travail sans éclairage d'appoint, l'éclairement a été jugé suffisant.

Cet exemple montre qu'une économie importante d'énergie peut être obtenues simultanément à une amélioration de l'éclairage sur le plan ergonomique et économique.



## 3. ÉCLAIRAGE NATUREL 43

■ 3.1 Spécificité de la lumière naturelle 45

■ 3.2 Ouvertures 49



## 3. ECLAIRAGE NATUREL

### 3.1 SPÉCIFICITÉ DE LA LUMIÈRE NATURELLE

#### ■ Rendu des couleurs

Les tâches accomplies dans l'industrie sont nombreuses et variées. Parmi celles-ci, les opérations de contrôle de qualité et de contrôle d'aspect font appel à la capacité de l'œil humain à discerner d'infimes variations de couleurs ou de texture. La qualité de la lumière naturelle, et notamment sa capacité à rendre fidèlement les couleurs, peuvent être mises à profit à cet effet.

#### ■ Lumière directe et diffuse

Les pénétrations solaires directes doivent impérativement être bannies aux postes de travail : l'éblouissement engendre une baisse de la performance visuelle. Ceci peut non seulement avoir des conséquences sur la qualité du travail fourni, mais aussi sur la sécurité du personnel (accidents du travail). On privilégiera donc les apports de lumière diffuse et on limitera au minimum les ombres portées.

### 3.2 OUVERTURES

#### ■ Dimensionnement des ouvertures

D'une manière générale, on retiendra qu'une grande part de la lumière théoriquement disponible est en fait absorbée par les installations techniques (luminaires, éléments de ventilation, etc.), ainsi que par le parc de machines et le mobilier. Le dimensionnement des ouvertures devra donc être effectué en conséquence.

La plupart des locaux de production est constituée de halles de dimensions diverses. Dans la plupart des cas, il est souhaitable de tirer profit d'ouvertures en toitures pour éclairer ces dernières. Les niveaux de facteur de lumière de jour élevés qui peuvent être atteints de cette manière permettent, d'atteindre une autonomie importante en éclairage naturel. La table 3.1 illustre l'importance de cette autonomie.

Eclairage requis [Lux]	Facteur de lumière de jour [%]	Autonomie en éclairage naturel [%]
200	5	80
	10	90
	20	95
300	5	75
	10	85
	20	90
500	5	50
	10	80
	20	85

Table 3.1 : Fraction d'autonomie en éclairage naturel atteignable dans une halle industrielle.

### ■ Positionnement de l'ouverture

La position de l'ouverture est un paramètre déterminant en ce qui concerne la quantité de lumière disponible. La figure 3.1 illustre cela : chacune des baies produit le même éclairement au poste de travail (point A). Celui-ci étant situé à égale distance des ouvertures, on constate que les ouvertures en toiture sont plus efficaces. Cela s'explique par le fait qu'elle "voient" tout le ciel, alors que les ouvertures en façade ne "voient" au mieux qu'un demi-ciel (en absence de masques extérieurs).

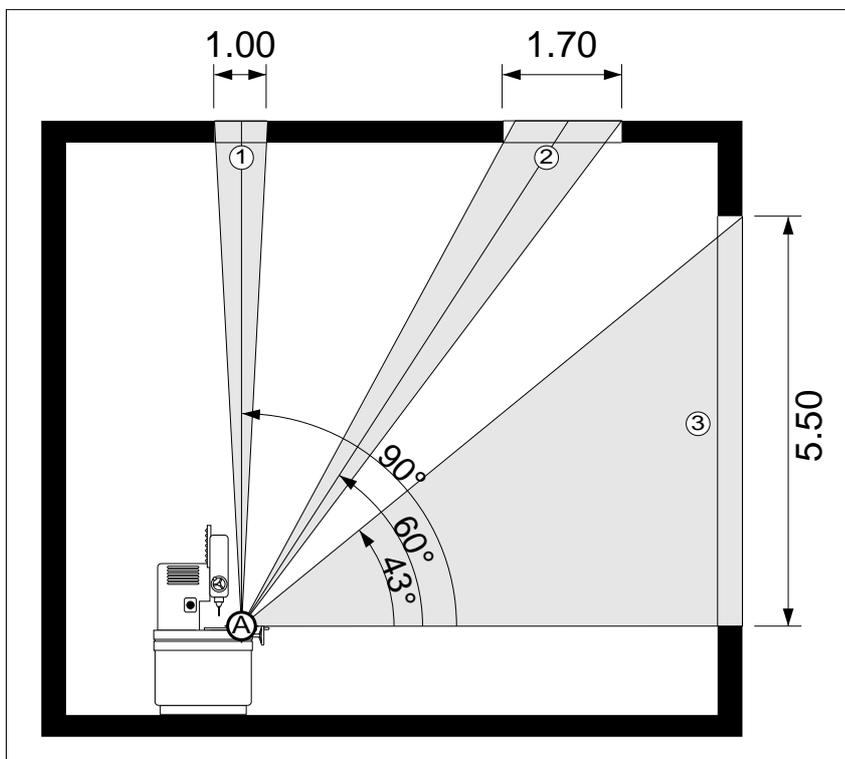


Fig. 3.1 : Influence de la position de l'ouverture sur l'éclairement au poste de travail (les ouvertures zénithales sont plus efficaces).

Les ouvertures zénithales sont indiquées pour l'éclairage des halles de production. Celles-ci ne répondent toutefois pas au besoin psycho-physiologique du contact visuel direct avec l'extérieur. Il faut donc toujours veiller à prévoir un nombre suffisant de fenêtres en façade.



## ■ Ouvertures zénithales

### – Ouvertures “horizontales”

Les halles industrielles sont parfois équipées de lanterneaux ponctuels ou linéaires. Ces ouvertures sont très efficaces par temps couvert et procurent des niveaux de facteur de lumière du jour très importants (entre 5 et 20 %). La sélection saisonnière des rayons solaires s'effectue malheureusement à l'inverse de ce qui est souhaitable. Les pénétrations solaires sont en effet très faibles en hiver et maximales en été (voir figure 3.2). Il est donc nécessaire de prévoir une protection solaire extérieure afin d'éviter les surchauffes estivales. On utilisera de préférence un matériau de vitrage opalescent, afin de diffuser les rayons solaires qui traversent la protection en hiver.

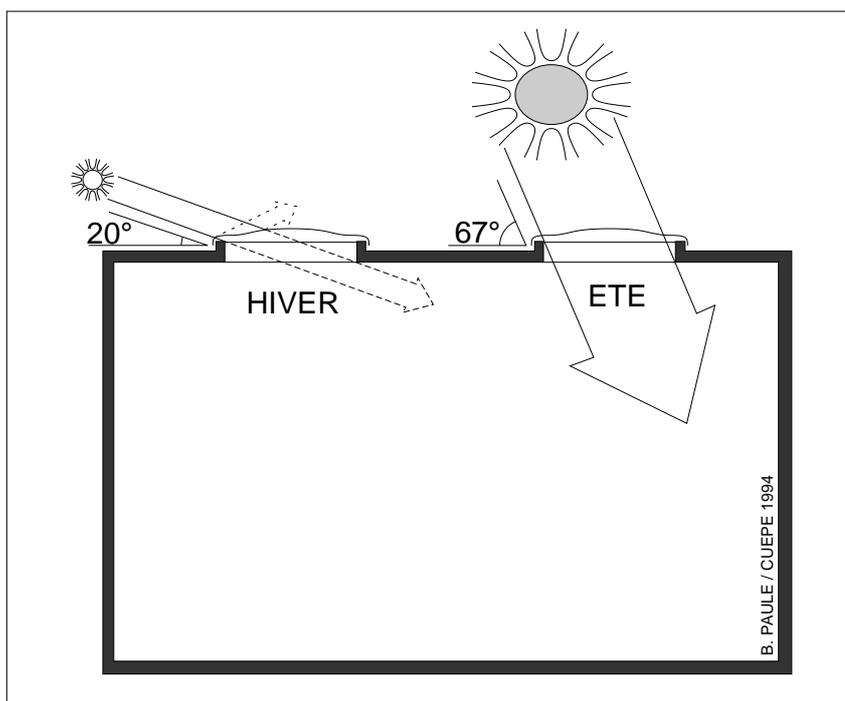


Fig. 3.2 : Pénétration de la lumière directe en fonction de la saison.

### – Sheds orientés au Nord

Les sheds orientés au Nord sont très répandus dans l'industrie (voir figure 3.3). Ils permettent de s'affranchir des problèmes de surchauffe et d'éblouissement dus aux pénétrations solaires. Leurs performances en lumière diffuse sont limitées dans la mesure où le vitrage ne “voit” que la moitié de la voûte céleste. Ce type de système donne à la lumière disponible une certaine directionnalité, qui doit être prise en compte au niveau de l'aménagement des postes de travail (voir figure 3.3).

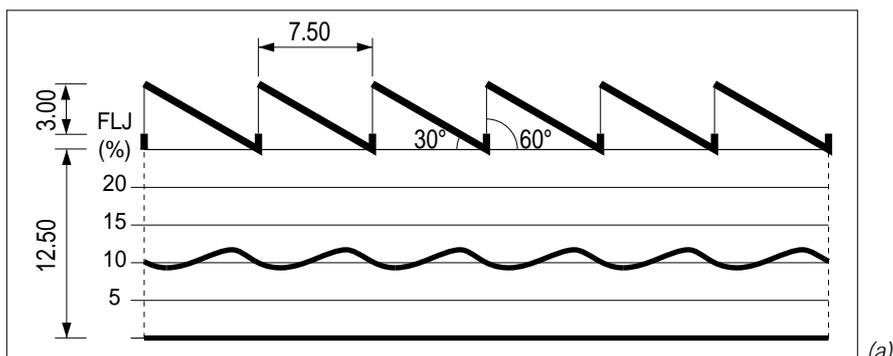
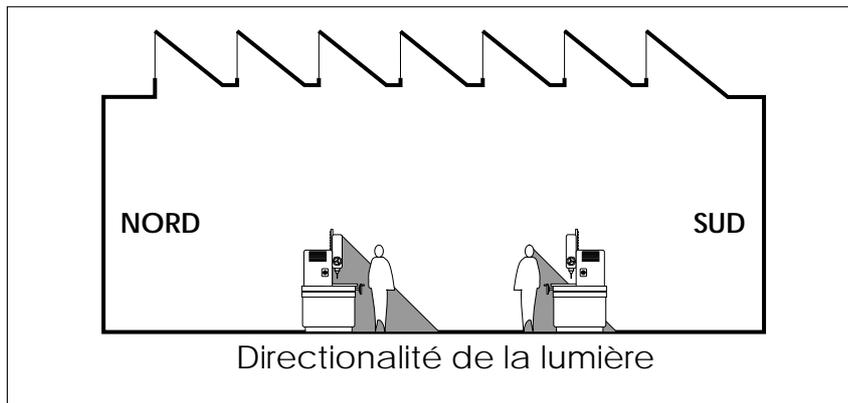


Fig. 3.3 : Performances lumineuses de sheds orientés au nord.  
(a) facteur de lumière du jour  
(b) ombres portées



(b)

#### - Sheds inclinés

La figure 3.4 illustre les performances de sheds inclinés à  $60^\circ$  sur l'horizon. On constate une hausse de 80 % du niveau moyen du facteur de lumière du jour par rapport au cas précédent. Cette configuration est très performante. Le contrôle des pénétrations solaires est relativement efficace (à l'exception du début et de la fin de journée en été). Il convient de bloquer les rayons solaires qui pourraient arriver sur le plan de travail pendant ces périodes. Ceci peut être réalisé soit en choisissant un matériau de vitrage opalescent, soit en disposant un écran diffusant derrière le vitrage (stores en tissu par exemple).

On notera que cette disposition permet de réduire l'inclinaison de la face arrière du shed (voir figure 3.5). Celle-ci est alors plus largement éclairée, ce qui présente deux avantages :

- la directionnalité de la lumière disponible est atténuée (la face arrière du shed se comporte comme une source lumineuse secondaire) ;
- le contraste de luminance entre le vitrage et la sous-face de la toiture est réduit.

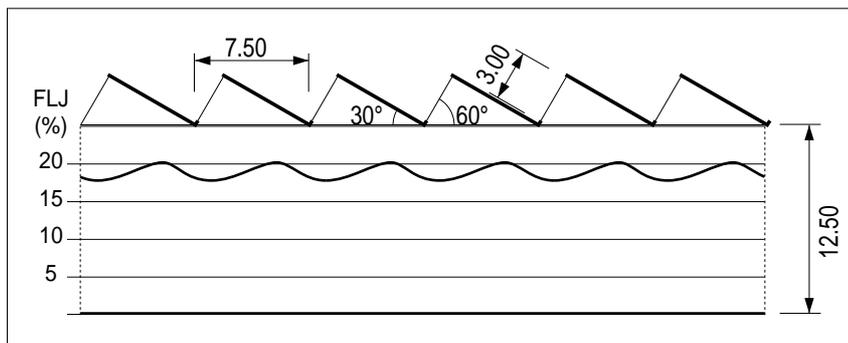


Fig. 3.4 : Performances lumineuses de sheds inclinés sur l'horizon (orientation nord).

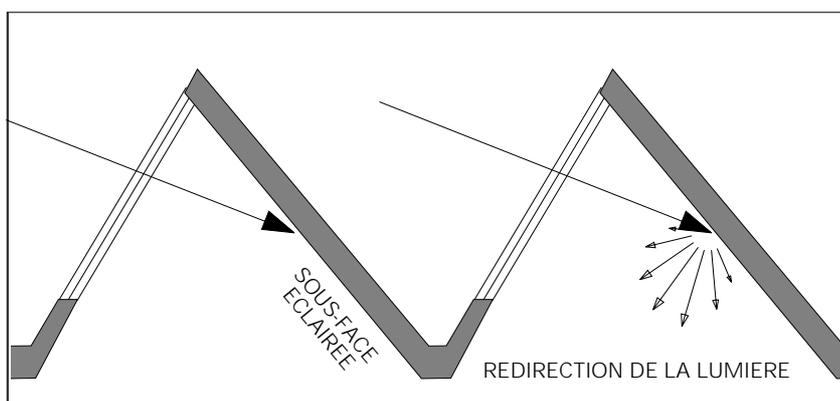


Fig. 3.5 : Vue d'une halle munie de sheds inclinés (uniformisation du contraste).



### – Sheds orientés au Sud

La portion sud de la voûte céleste représente la composante principale du gisement lumineux disponible. Il est donc, en principe, préférable d'orienter l'ouverture des sheds vers le Sud. Cette option a, par ailleurs, pour avantage d'accroître les gains solaires captés par le bâtiment et donc de réduire les pertes nettes d'énergie de l'ouverture. La figure 3.6 montre l'influence de l'orientation du shed sur la consommation énergétique d'une halle industrielle. Dans ce cas de figure, il est impératif de prévoir une protection solaire extérieure, afin d'éviter les surchauffes estivales. La figure 3.8 illustre quelques types de protections solaires extérieures. Celle-ci doit être conçue de façon à laisser pénétrer les rayons solaires hivernaux (disposition géométrique, dispositif mobile). Ces rayons doivent être de préférence diffusés par un matériau de vitrage opalescent. On atténue ainsi le risque d'éblouissement tout en profitant des apports thermiques et lumineux en saison hivernale.

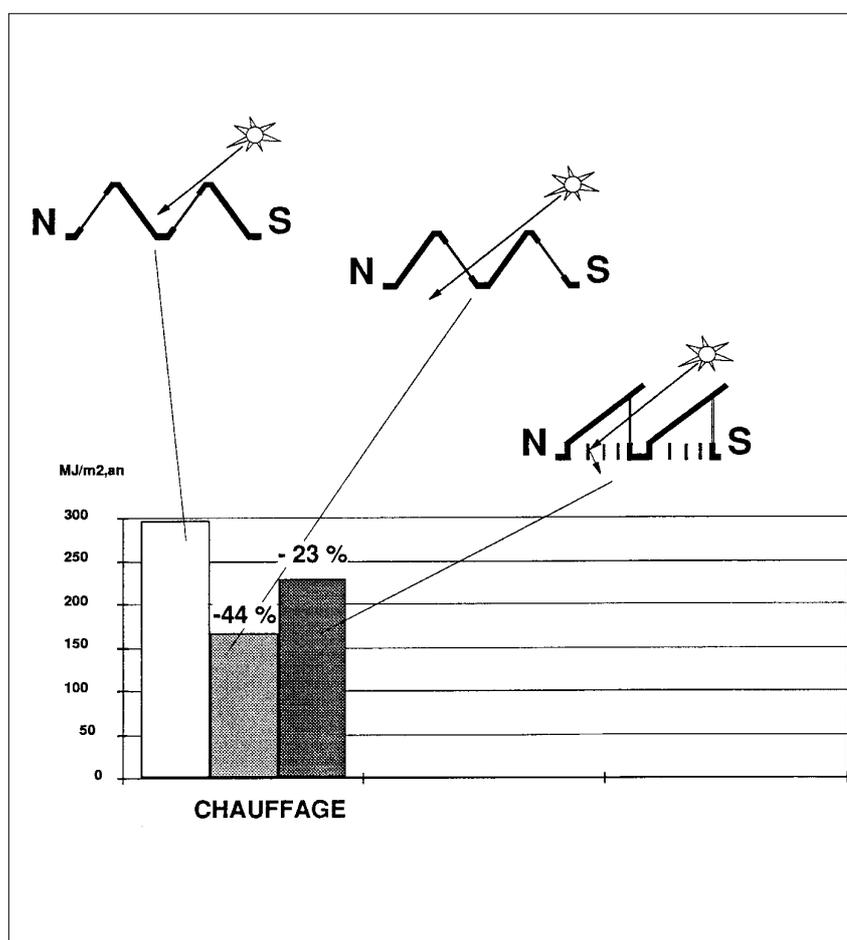


Fig. 3.6 : Influence de l'orientation des sheds sur la consommation en chaleur d'une halle industrielle.

### – Sheds à double pan

Il est possible de mettre en œuvre des sheds vitrés simultanément au nord et au sud. L'intérêt est de bénéficier à la fois de la lumière diffuse venant du nord et des apports solaires venant du sud. Comme dans le cas précédent, il est nécessaire de prévoir un système de protection solaire extérieur pour le vitrage sud. Celui-ci sera de préférence équipé d'un matériau opalescent (verre armé, isolation translucide, etc.).

## ■ Ouvertures en façade

Les ouvertures en façade présentent l'avantage d'offrir un contact visuel direct avec l'extérieur. Du point de vue psychologique, ce facteur est déterminant quant à "l'agrément" des utilisateurs. Cette notion doit être prise en compte dans la mesure où un environnement de travail agréable influe directement sur le comportement des usagers ; il peut avoir des répercussions favorables sur leur bien-être et leur performances (réduction du stress, diminution des états dépressifs, etc.).

Les problèmes d'éblouissement, engendrés par les ouvertures en façade ne doivent toutefois pas être sous-estimés. D'une manière générale, le contraste entre l'ouverture et son encadrement doit être aussi faible que possible. Les murs et les cadres doivent être, de préférence, traités avec des revêtements de couleur claire. Une ouverture de petite taille risque par ailleurs d'être perçue comme une source ponctuelle éblouissante. La présence d'une ouverture à proximité d'une paroi (cloisons intermédiaires, angles des bâtiments) est favorable : l'effet de contre-jour est atténué (voir figure 3.7).

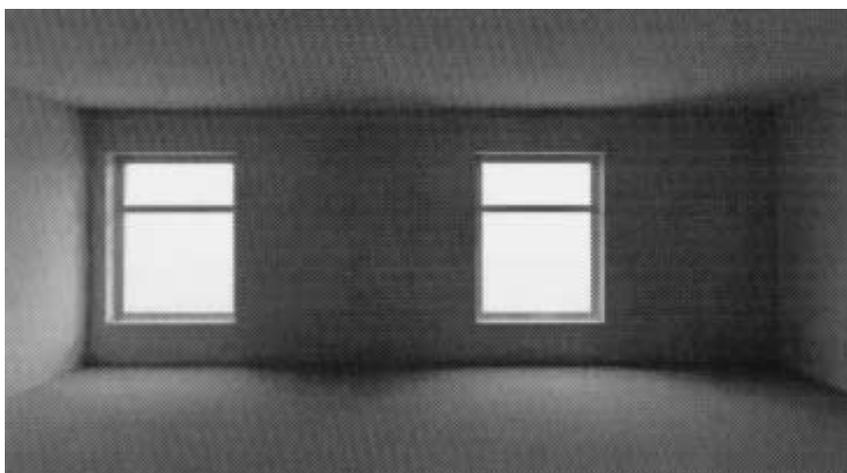


Fig. 3.7 : Influence de la proximité d'une paroi sur l'effet de contre-jour causé par une ouverture en façade.

## ■ Protections solaires

Pour des raisons de coût et de maintenance, la mise en œuvre d'éléments de protection solaire mobile est généralement déconseillée pour des ouvertures en toiture. Les protections fixes sont malheureusement très pénalisantes pendant la saison hivernale pour la lumière diffuse (elle doivent laisser pénétrer la lumière directe).

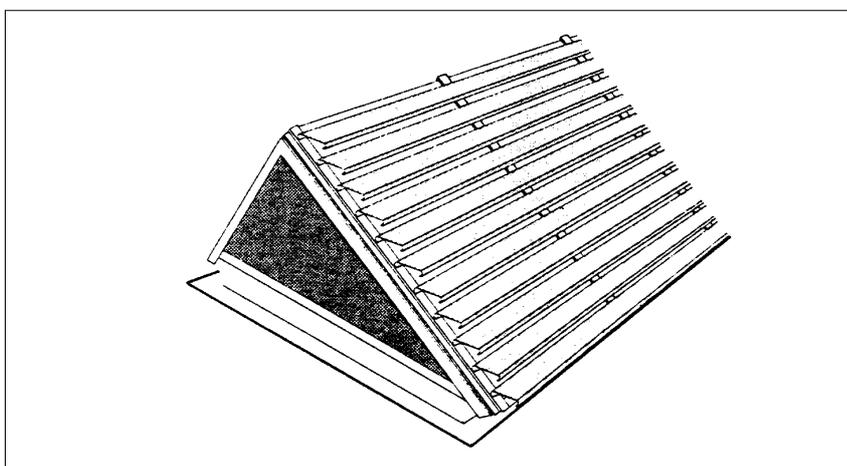


Fig. 3.8 : Exemples de protection solaire extérieure fixe et mobile.

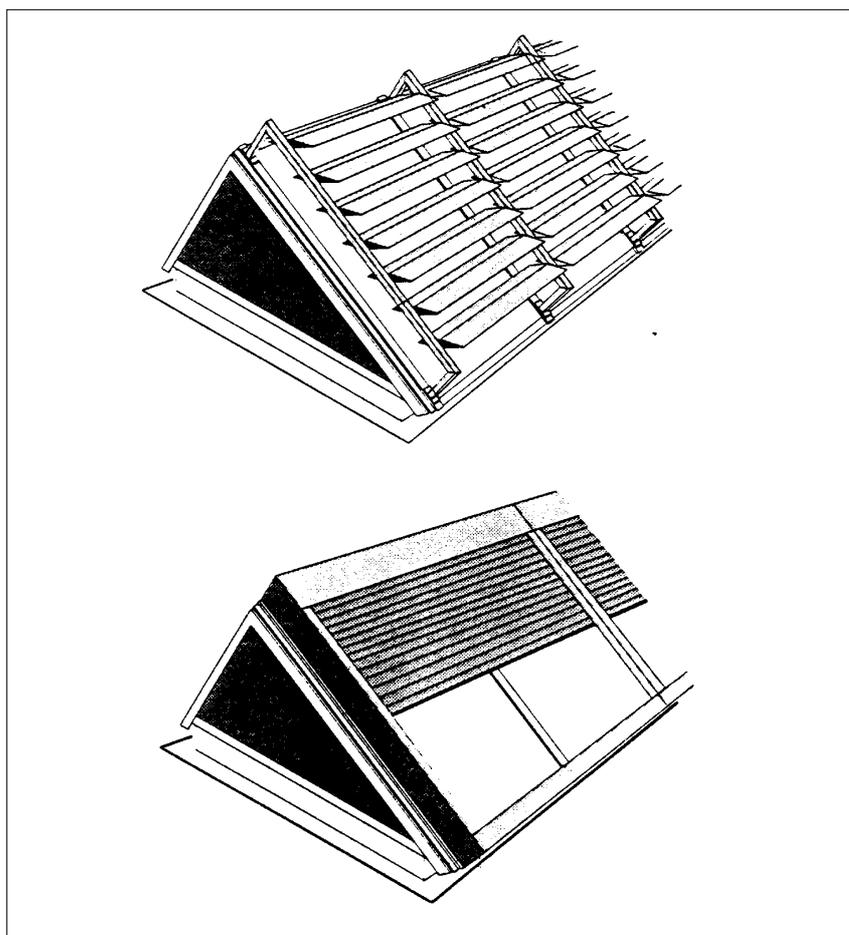


Fig. 3.8 (suite) : Exemples de protection solaire extérieure fixe et mobile.

La mise en œuvre de protections solaires "semi-mobiles" (deux positions saisonnières) permet de résoudre simplement ce problème. Ces systèmes doivent être manipulés deux fois par an seulement (aux équinoxes par exemple) [32].



4. ÉCLAIRAGE DE SECOURS ET DE SÉCURITÉ	53
■ 4.1 Eclairage de secours	55
■ 4.2 Eclairage de sécurité	55



## 4. ECLAIRAGE DE SECOURS ET DE SECURITE

### 4.1 ECLAIRAGE DE SECOURS

La fonction de l'éclairage de secours est de permettre l'évacuation des locaux et la mise en place des secours en cas d'accident grave. Il faut, pour cela, éviter la sensation d'obscurité qui risque de se produire d'autant plus facilement que le niveau d'éclairage habituel est élevé : on recommande, donc, que l'éclairage de sécurité garantisse au moins 1/10e de l'éclairage normal.

L'éclairage de secours ne recèle pas un grand potentiel d'économie d'énergie ; il ne faut donc pas en tenir compte de façon prioritaire lors de l'étude.

On mentionnera, toutefois, que des ballasts électroniques peuvent procurer, en ce qui le concerne, un avantage tant sur le plan énergétique que technique ; ceux-ci conviennent généralement à une installation à courant continu. La référence [21] illustre ce sujet.

### 4.2 ECLAIRAGE DE SÉCURITÉ

Le canal visuel constitue une voie privilégiée pour le transport d'informations nécessaires au travail moderne. Les tâches de contrôle à distance, de conduite d'engins, de contrôle de qualité requièrent la perception d'indicateurs et de signaux visuels, nombreux et difficiles à identifier. Tout ce qui vient altérer cette perception perturbe par là même le travail et peut influencer la sécurité. Toute déficience de l'ambiance lumineuse constitue une source potentielle de dysfonctionnement. En précisant les variables qui interviennent dans la détermination des niveaux d'éclairage appropriés, l'ergonome fournit des instruments d'analyse pour une meilleure compréhension des mécanismes qui peuvent conduire à l'accident.

L'encadré suivant rappelle les principaux facteurs responsables d'accidents dans l'industrie.

#### Principaux facteurs de sécurité

- Visibilité des signaux
- Fatigue visuelle
- Effet stroboscopique (machines rotatives)
- Obstacles non visibles :
  - par effet d'adaptation à la lumière (entrée des halles)
  - par manque de contraste (signaux)
  - par effet d'induction de contraste (couleurs)



L'éclairage de sécurité a pour but de minimiser les risques d'accident. Nous traiterons rapidement ici d'un aspect qui a malheureusement très souvent des conséquences graves dans l'industrie : il s'agit du problème de l'éclairage de l'entrées des halles industrielles.

Le niveau d'éclairement très différent, existant entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, conduit à une perception visuelle semblable à celle ressentie à l'entrée d'un tunnel, pour les personnes qui pénètrent rapidement dans ce dernier (problème d'adaptation visuelle). Cela se traduit par une difficulté à distinguer les objets et machines à l'entrée.

L'étude des causes de certains accidents a montré que cet effet peut être considérablement atténué par le biais d'un éclairage approprié de l'entrée des halles. Une étude en éclairage ne tient malheureusement souvent pas compte de ce problème.

Ainsi, avec une faible augmentation de la consommation d'électricité, on peut, dans ce cas, obtenir une amélioration considérable des conditions de sécurité.



<b>5. MAINTENANCE</b>	<b>57</b>
■ 5.1 Encrassement des installations	59
■ 5.2 Vieillessement des sources	60
■ 5.3 Considérations économiques	60
■ 5.4 Remplacement des sources	60



## 5. MAINTENANCE

### 5.1 ENCRASSEMENT DES INSTALLATIONS

L'encrassement des sources, des luminaires et des parois des locaux, sont responsables de la diminution constante et régulière du flux lumineux : en conséquence, l'éclairage sur le plan de travail devient plus faible. On veillera donc à nettoyer périodiquement ces derniers et à rafraîchir les locaux si nécessaire.

Il est dans la plupart des cas recommandé de prévoir un nettoyage systématique bisannuel. Dans les ateliers très poussiéreux, il est indispensable d'exécuter ce dernier trois à quatre fois par année. Un nettoyage effectué dans les règles de l'art permet d'augmenter l'éclairage de 25 à 50 %. Une telle opération contribue, par ailleurs, à maintenir un rendement lumineux élevé pour l'installation : elle permet donc d'économiser de l'énergie [23].

La figure 5.1 montre la diminution rapide de l'éclairage (caractéristique des bâtiments industriels), provoquée par un encrassement modéré à fort des sources et des luminaires. Ceux-ci doivent être nettoyés lorsque le niveau d'éclairage atteint 80 % de sa valeur nominale.

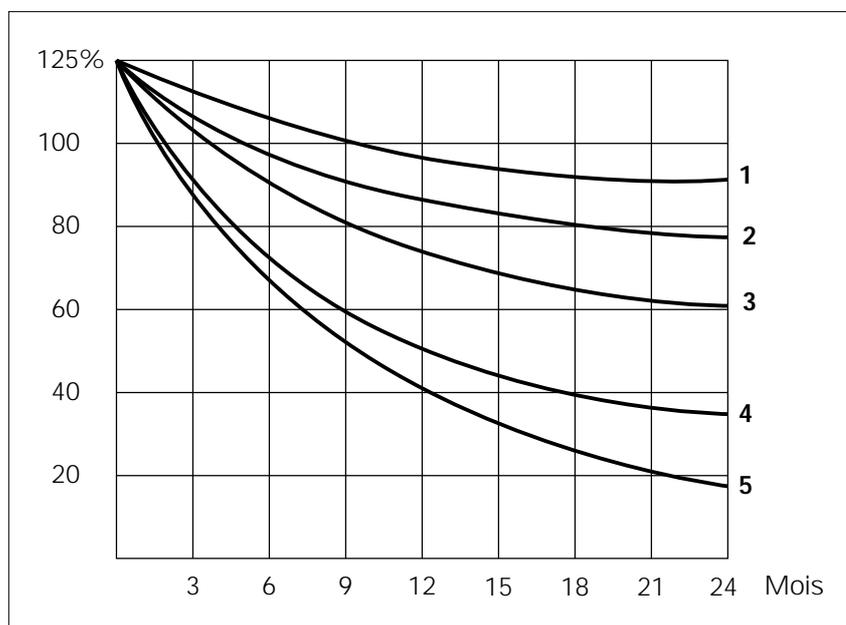


Fig. 5.1 : Diminution du flux lumineux d'une installation par encrassement.

#### Règle importante

Il est d'autant plus difficile de redonner à un réflecteur sa propriété originelle, que l'intervalle entre deux nettoyages est long.

Si cet intervalle est suffisamment court, l'utilisation de chiffons secs suffit [32]. Le nettoyage par voie humide ne donne généralement pas, dans ce cas, de meilleurs résultats.



## 5.2 VIEILLISSEMENT DES SOURCES

Malgré un nettoyage soigneux, il n'est toutefois pas possible de retrouver la valeur originale de l'éclairage d'une installation : les sources subissent, en effet, un affaiblissement régulier de leur flux lumineux pendant leur durée de vie.

L'affaiblissement du flux lumineux des lampes à décharge à haute pression, dans des luminaires fermés, est considérablement plus important que dans des luminaires ouverts. Les pertes lumineuses dues à l'encrassement sont par contre plus élevées dans des luminaires ouverts, que dans des luminaires fermés.

### Recommandation

On évitera d'utiliser des luminaires, munis de réflecteurs en aluminium, et ouverts vers le bas, dans des locaux caractérisés par un fort encrassement (fonderies par exemple). Les luminaires doivent être impérativement fermés par un verre de protection.

## 5.3 CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES

La démarche, qui semble la plus logique pour un maître d'ouvrage, est de faire l'acquisition de sources et de luminaires les plus avantageux. Cette solution se traduit le plus souvent, en termes de maintenance et d'exploitation, par des coûts élevés.

Une étude, réalisée dans différentes fonderies, a porté sur l'analyse des coûts occasionnés par des installations d'éclairage, équipées de différents types de luminaires. On observe ainsi, à même conditions d'exploitation, de grandes différences entre les différents types de luminaires. On constate souvent, par ailleurs, que le luminaire le plus économique (dont le prix d'achat équivaut à 1/3 de celui du plus coûteux) est celui qui engendre les coûts d'exploitation annuels les plus importants. Cela s'explique principalement par un affaiblissement plus rapide du flux lumineux, du fait de l'encrassement des sources et des réflecteurs.

La construction du luminaire, ainsi que les matériaux utilisés, ont, donc, une grande influence sur sa vitesse de dépréciation et sur les coûts d'exploitation.

## 5.4 REMPLACEMENT DES SOURCES

Lors de la réalisation d'une installation d'éclairage, on doit veiller à ce que tous les luminaires soient facilement accessibles. Cette remarque s'applique tout particulièrement à des halles de hauteur importante : la maintenance et le remplacement des sources peuvent, dans certains cas, occasionner des frais très importants.



D'une manière générale, il vaut la peine d'accorder une attention particulière aux dispositifs de fixation des luminaires. Pour des locaux de grande hauteur, il existe par exemple des dispositifs de suspension spéciaux, qui permettent d'amener les luminaires à l'aide d'un câble pour les nettoyer (voir figure 5.2).



*Fig. 5.2 : Système de suspension des luminaires par fil (réduction des coûts d'entretien).*

## Technique de maintenance

Dans la plupart des cas, il est recommandé de procéder à un remplacement des sources par groupe. Les fabricants sont parvenus à une grande précision en ce qui concerne la durée de vie des sources : elle se situe dans une étroite fourchette. Les coûts de maintenance peuvent ainsi être considérablement réduits.



6. SOURCES	63
■ 6.1 Considérations générales	65
■ 6.2 Choix des sources	67



## 6. SOURCES

### 6.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Les performances lumineuses des sources peuvent être évaluées sur la base des critères suivants :

- Efficacité lumineuse
- Flux lumineux
- Affaiblissement du flux lumineux du au vieillissement
- Température et rendu des couleurs
- Gammes de puissance disponibles
- Durée de vie
- Contraintes d'utilisation
- Prix de revient
- Coûts d'exploitation

#### ■ Efficacité lumineuse

L'efficacité lumineuse des sources dépend du mode de production de la lumière (type de source) et de leur puissance ; il peut également être influencé par les caractéristiques de température et de rendu des couleurs.

#### Remarque importante

Les catalogues de fabricants indiquent, en règle générale, l'efficacité lumineuse des sources (important du point de vue de la consommation d'énergie). Il faut, toutefois, dans la pratique, prendre aussi en compte les pertes énergétiques des appareils auxiliaires (ballasts, transformateurs). La comparaison du rendement de deux installations d'éclairage n'est possible que si l'on considère leurs consommations globales.

Les consommations caractéristiques des lampes à décharge haute pression sont données ci-après ; celles des tubes fluorescents font l'objet du chapitre 8.

#### ■ Durée de vie

L'encadré suivant rappelle les différentes distinctions nécessaires, en ce qui concerne la notion de durée de vie des sources.

## Notion de durée de vie

On distingue trois interprétations possibles de la notion de durée de vie des sources :

- **Durée de vie moyenne**

Intervalle de temps à partir duquel plus de 50 % de l'ensemble des sources ont cessé de fonctionner

- **Durée de vie économique**

Intervalle de temps pour lequel un remplacement des sources est indiqué pour des raisons de coût d'exploitation, par suite de l'encrassement et du vieillissement des sources

- **Durée de vie garantie**

Durée pendant laquelle le remplacement des sources, en cas de défaillance, est garanti par le fabricant.

La durée de vie de certaines sources dépend de leur fréquence d'enclenchement (lampes à décharge, tubes fluorescents). Les indications, données par le fabricant, se rapporte généralement à un temps de fonctionnement minimal entre deux commutations (3 h pour des tubes fluorescents, 5 à 10 h pour les lampes à décharge haute pression).

## ■ Température et rendu des couleurs

L'indice de rendu des couleurs rend compte de la qualité de la restitution des couleurs d'un objet, éclairé par une source lumineuse, par rapport à une source de référence de même température de couleur (corps noir, lumière du jour).

Le document d'introduction "Éléments d'éclairagisme" donne des valeurs caractéristiques de cet indice pour différents types de sources. L'indice de rendu des couleurs est classé selon 6 catégories définies par la norme DIN 5035.

La table 6.1 donne une définition de ces catégories ; ces dernières sont utilisées dans le cadre de l'analyse de la valeur utile d'une installation (voir paragraphe 2.3).

On rappellera que l'indice de rendu des couleurs ( $R_a$ ) se rapporte à la température de couleur de la source considérée. La lumière d'une source à incandescence est donc taxée d'une valeur maximale de 100 (comme la lumière naturelle), même si les températures de couleur de ces deux sources lumineuses sont très différentes (2700 K et 6500 K resp.). C'est la raison pour laquelle les couleurs d'un même objet apparaissent très différentes sous ces deux sources.

Cette propriété de l'indice de rendu des couleurs provient de sa définition (cf. document "Éléments d'éclairagisme") ; la source de référence est fonction de la température de couleur de la source considérée (source de référence = lumière naturelle au-delà de 4000 K).

L'indice de rendu des couleurs n'est donc que partiellement approprié à l'évaluation objective des propriétés spectrales d'une source. Des aspects subjectifs liés au mécanisme de perception des couleurs ont, par ailleurs, pour effet de rendre plus agréable, à faible éclairage, une température de couleur "chaude" ( $T_c = \text{env. } 3000 \text{ K}$ ) qu'une température "froide" ( $T_c = \text{env. } 5000 \text{ K}$ ), même si l'indice de rendu des



Classes DIN	Correspondance avec le corps noir de même température de couleur	Indice de rendu des couleurs (RA)	Type de sources
1 A	très bon	90... 100	Lampes à incandescence, tubes fluorescents (de luxe)
1 B	très bon	80... <90	Tubes fluorescents (3 bandes), halogénures métalliques Lampe à induction
2 A	bon	70... <80	Tubes fluorescents, halogénures métalliques
2 B	bon	60... <70	Tubes fluorescents, halogénures métalliques, sodium haute pression (SDW – T)
3	suffisant	40... <60	Tubes fluorescents, halogénures métalliques, vapeurs de mercure haute pression, sodium haute (de luxe), lumière mixte
4	médiocre	20... <40	Sodium haute pression, sodium basse pression

Table 6.1 : Indice de rendu des couleurs de différentes sources.

couleurs est plus défavorable. Cela n'est vrai, toutefois, que pour les valeurs d'éclairement que l'on rencontre dans les bâtiments (300 à 2000 Lux) ; l'abaque de Kruithof illustre cet aspect psychologique de la perception des couleurs (cf. "Éléments d'éclairagisme").

## 6.2 CHOIX DES SOURCES

Les différents types de sources sont décrits de manière détaillée dans le document consacré aux notions d'éclairagisme, ainsi que dans les références [5] et [12]. Nous nous contenterons donc d'aborder ici certaines caractéristiques spécifiques de ces dernières.

### ■ Lampes à incandescence et lampes halogènes

Les lampes à incandescence et les lampes halogènes sont des sources peu efficaces de lumière ; elles ne doivent donc être utilisées que si leur consommation (idéalement au maximum 20 W) et leur durée d'utilisation sont minimales.

### ■ Lampes fluorescentes compactes

Pour des prestations en éclairage identiques (même flux lumineux), les lampes fluorescentes compactes permettent de réaliser des économies d'environ 75 % par rapport aux lampes à incandescence.

## ■ Tubes fluorescents

Dans les plages de puissance de 36 à 58 W, les tubes fluorescents sont plus efficaces que les lampes fluorescentes compactes. Par rapport à des lampes à incandescence, ils permettent de réaliser une économie d'énergie de l'ordre de 80 %.

Pour la plupart des anciennes installations, il existe un potentiel d'économie d'énergie de 5 à 10 % qui peut être mis à profit en remplaçant simplement les anciens tubes fluorescents (diamètre 38 mm) par de nouveaux tubes (diamètre 26 mm).

On relèvera, toutefois, les points importants suivants :

- l'augmentation du flux lumineux, qui résulte du remplacement des tubes, peut contribuer à accentuer l'effet d'éblouissement direct pour certaines installations (tubes sans paralumes, luminaires mal placés) ;
- l'utilisation de nouveaux tubes est impossible avec certains ballasts d'ancienne génération.

Il est recommandé de procéder à un essai préalable avec un seul luminaire.

La table 6.2 donne une comparaison des caractéristiques des deux générations de tubes fluorescents.

Puissance du tube [W] D 26 mm	Puissance du tube [W] D 38 mm	Longueur (mm)
18	20	590
36	40	1200
38	42	1047
58	65	1500

Table 6.2 : Consommation des tubes fluorescents d'ancienne et de nouvelle génération.

Les tubes fluorescents sont proposés généralement dans trois classes différentes : standard, 3 bandes et De Luxe. Ces tubes se distinguent par leur efficacité lumineuse, leur indice de rendu des couleurs et leur coût. La table 6.3 résume cela.

Classe	Flux lumineux relatif	Rendu des couleurs	Prix relatifs
Tubes standard	1	médiocre	1
Tubes à trois bandes	1,1	bonne	env. 2
Tubes De Luxe	0,7	très bonne	env. 2,3

Table 6.3 : Caractéristiques des différentes catégories de tubes fluorescents.

Dans de nombreux cas d'application, les tubes à 3 bandes, plus coûteux, sont toutefois plus rentables à long terme. Le choix d'un équipement auxiliaire approprié (ballasts faibles pertes ou électroniques) conduit à des économies d'énergie substantielles. Celles-ci atteignent jusqu'à 30 % en cas de remplacement de ballasts magnétiques d'ancienne génération (10 à 15 ans) par des ballasts électroniques à haute fréquence.

## ■ Lampes à vapeur de mercure

L'usage de lampes à vapeur de mercure est, aujourd'hui, déconseillé, du fait de leur mauvais comportement en cours d'exploitation (altération des caractéristiques de température de couleur).



Pour de faibles puissances (jusqu'à 125 W), les lampes fluorescentes compactes représentent une excellente alternative ; on optera, dans les autres cas, pour des lampes à halogénures métalliques ou pour des lampes à vapeur de sodium haute pression.

## ■ Lampes à halogénures métalliques

Les lampes à halogénures métalliques de faible puissance (35 à 150 W) sont compactes : leur flux lumineux peut donc être aisément focalisé. Elles représentent en termes d'énergie une excellente alternative aux lampes à incandescence et halogènes, lorsqu'il s'agit de disposer d'un flux lumineux élevé pour chaque source (éclairage ponctuel).

## ■ Lampes à vapeur de sodium haute pression

Les remarques valables pour les lampes à halogénures métalliques sont également applicables aux lampes à vapeur de sodium haute pression (De Luxe).

### **Economies d'énergie réalisées grâce à la nouvelle génération de lampes à décharge**

L'utilisation de lampes à halogénures métalliques ou de lampes à vapeurs de sodium haute pression de puissance élevée (250 à 400 W) permet des économies de 15 à 40 % par rapport à des lampes à décharge d'ancienne génération (lampes à vapeurs de sodium basse pression, lampes à vapeurs de mercure). Le remplacement de ce type de sources est généralement possible dans des halles industrielles et des entrepôts de grande hauteur (cf. paragraphe 2.9). Cela est principalement dû à l'efficacité lumineuse supérieure de cette nouvelle génération de lampes à décharge.

Les lampes à vapeur de sodium se distinguent par leur teinte jaunâtre, qui se traduit par un indice de rendu des couleurs moyen ; elles sont, toutefois, généralement bien acceptées dans les applications industrielles. Les lampes au sodium, dites "De Luxe", ne présentent pas ce problème : leur indice de rendu des couleurs est plus élevé (Ra = env. 60).

La table 6.4 résume les caractéristiques principales des lampes à décharge de la nouvelle génération.

## ■ Lampes à induction

Les lampes à induction se distinguent par leur grande durée de vie (60000 heures). Leur emploi est particulièrement approprié à des halles de grande hauteur, pour lesquelles la maintenance des sources est problématique. Il convient, toutefois, de ne pas négliger les contraintes de maintenance, causées par encrassement (poussière, particules, etc.), auquel n'échappe pas la lampe à induction. Le document "Eléments d'éclairagisme" présente, en détail, le fonctionnement de ce type de source.



Type de sources	Consommation lampes	Consommation ballast	Consommation globale	Efficacité lumineuse [lm/W]
Lampe à halogénures métalliques	35 W	13 W	48 W	50
Lampe à halogénures métalliques	70 W	18 W	88 W	57
Lampe à halogénures métalliques	150 W	20 W	170 W	65
Lampe à halogénures métalliques	250 W	25 W	275 W	73
Lampe à halogénures métalliques	400 W	40 W	440 W	80
Lampe à vapeur de sodium haute pression (De Luxe blanc)	35 W	10 W	45 W	41
Lampe à vapeur de sodium haute pression (De Luxe blanc)	70 W	16 W	86 W	54
Lampe à vapeur de sodium haute pression (De Luxe blanc)	150 W	20 W	170 W	74
Lampe à vapeur de sodium haute pression (De Luxe blanc)	250 W	25 W	275 W	84
Lampe à vapeur de sodium haute pression (De Luxe blanc)	400 W	50 W	450 W	85

Table 6.4 : Efficacité lumineuse des lampes à décharge haute pression.



<b>7. LUMINAIRES</b>	<b>71</b>
■ 7.1 Choix des luminaires	73
■ 7.2 Importance du rendement	73
■ 7.3 Disposition des luminaires	74
■ 7.4 Conditionnement des locaux	74



## 7. LUMINAIRES

### 7.1 CHOIX DES LUMINAIRES

Les locaux industriels ont généralement des affectations qui changent au cours du temps. Comme il est souvent judicieux, pour des raisons économiques, d'opter pour un seul type de luminaires, on accordera donc une grande attention à leur flexibilité sur le plan technique. Sur certains modèles, les réflecteurs peuvent être réglés, remplacés et combinés avec différents paralumes : cette caractéristique contribue grandement à leur souplesse d'utilisation.

Le document d'introduction ("Eléments d'éclairagisme") donne un aperçu détaillé des caractéristiques principales à prendre en compte lors du choix de ces luminaires (confort visuel, propriétés photométriques, etc.). L'adjonction de paralumes permet de réduire les risques d'éblouissement direct et contribue donc à l'amélioration des conditions de travail (confort visuel, sécurité).

#### ■ Luminaires montés sur rails

Les systèmes de fixation de luminaires par rails sont extrêmement rationnels et s'utilisent déjà en grand nombre. Ils se composent de rails porteurs, sur lesquels viennent se raccorder simplement des luminaires, qui peuvent facilement être déplacés et remplacés. Grâce à des systèmes modulaires, ils peuvent généralement être utilisés pour équiper des structures. Cela est aussi valable pour des luminaires à paralume.

#### ■ Installation des luminaires

Le type de montage et le système de câblage représentent un point important lors du choix des luminaires ; ils peuvent influencer considérablement les coûts d'installation. Les systèmes, pouvant être raccordés et montés rapidement, ont à ce propos un réel avantage.

### 7.2 IMPORTANCE DU RENDEMENT

Le rendement d'un luminaire indique la proportion du flux lumineux, émis par la source, qui quitte effectivement ce dernier (cf. document "Eléments d'éclairagisme"). Un rendement supérieur à 80 % est qualifié de "très élevé" ; un rendement inférieur à 50 % de "faible" .

#### **Critères de choix des luminaires (rendement lumineux)**

Les caractéristiques constructives suivantes des luminaires permettent d'augmenter leur rendement, et donc de réduire à niveau d'éclairage constant leur consommation électrique :



- **Composants optiques**

Des surfaces réfléchissantes de qualité optique élevée permettent d'atteindre des facteurs de réflexion importants (réflecteurs, grilles paralumines) : cela favorise la réflexion de la lumière.

L'emploi de matériaux translucides de bonne qualité optique (verres, éléments protecteurs) permet de réduire les pertes lumineuses au travers de ces derniers et augmente d'autant la quantité de lumière émise dans le local.

- **Surfaces d'émission lumineuse**

Les petits luminaires "enveloppent" généralement de façon excessive les sources de lumière. Les luminaires à réflecteur parabolique se caractérisent, d'autre part, par une face latérale de hauteur importante.

Il est, pour ces raisons, préférable de faire appel à des luminaires dont la surface d'émission est grande, afin de réduire l'importance des pertes induites par ces effets (pertes lumineuses dans le luminaire).

- **Ecartement entre les sources**

Les luminaires, pourvus de plusieurs sources, se caractérisent par une absorption importante du flux lumineux par les sources elles-mêmes à l'intérieur du luminaire (elles ne sont pas réfléchissantes). L'écartement entre ces dernières doit donc être suffisamment important, sous peine de diminuer le rendement du luminaire.

## 7.3 DISPOSITION DES LUMINAIRES

En règle générale, l'équipement technique d'un bâtiment industriel est dicté par des impératifs liés à la production. La disposition des luminaires obéit généralement aussi à ce principe.

Les rangées de luminaires seront donc disposées perpendiculairement aux postes de travail. Les conditions de travail s'en trouveront ainsi améliorées grâce à une réduction des risques d'éblouissement et de présence d'ombres gênantes.

### ■ Sommiers

Dans les locaux caractérisés par des sommiers bas, ces derniers peuvent servir d'écran entre les luminaires, à condition de fixer ces derniers entre les structures porteuses. Les contraintes fixées par l'ergonomie au poste de travail sont toutefois déterminantes en ce qui concerne la disposition des luminaires.

## 7.4 CONDITIONNEMENT DES LOCAUX

Il est, en principe, préférable en cas de ventilation mécanique et de conditionnement des locaux (rafraîchissement, etc.) de combiner luminaires et prises de ventilation. L'air, évacué au travers de ce dernier,



permet de réduire la charge thermique des locaux due à la dissipation de chaleur du luminaire. Cette solution n'est toutefois, en pratique, pas toujours réalisable du fait du risque d'encrassement accéléré des luminaires qui peut en résulter (aspiration des poussières, etc.).

L'utilisation d'une ventilation par lac d'air froid (cf. document "Éléments d'éclairagisme") permet de réduire la taille des installations techniques ; elle contribue, par ailleurs, à créer une ventilation à la tâche (i.e. au poste de travail), du fait de sa dépendance des sources de chaleur (machines, ateliers, etc.).



## 8. APPAREILS AUXILIAIRES 77

■ 8.1 Considérations générales 79

■ 8.2 Ballasts pour tubes fluorescents 79



## 8. APPAREILS AUXILIAIRES

### 8.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Un grand nombre de sources requiert un équipement auxiliaire pour son fonctionnement (starter, ballast, etc.). Ce matériel se caractérise par une consommation électrique qui lui est propre (pertes énergétiques). Lorsque l'on compare différentes installations d'éclairage, il est indispensable de prendre en compte la puissance électrique consommée par cet équipement. Celle-ci n'est en rien négligeable dans le cas d'anciennes installations (30 % de consommation due aux ballasts magnétiques pour les tubes fluorescents).

Le comportement en termes de consommation énergétique de différents appareils auxiliaires est passé en revue ci-après.

#### ■ Lampes halogènes basse tension

Les lampes halogènes basse tension nécessitent un transformateur (conversion du courant alternatif 220V en basse tension) : celui-ci se caractérise par des pertes énergétiques non négligeables. Les dispositifs électroniques de la dernière génération sont plus petits que les transformateurs conventionnels : ils permettent généralement de réduire ces pertes.

#### ■ Lampes à décharge haute pression

Les ballasts propres à ce type de sources (limiteurs de courant de décharge) s'orientent de plus en plus vers l'électronique. Outre leur consommation spécifique généralement plus faible, les ballasts électroniques se caractérisent par :

- un réallumage possible à chaud ;
- un fonctionnement sans scintillement.

La consommation spécifique de ces ballasts est donnée à la table 6.4 (cf. chapitre 6).

### 8.2 BALLASTS POUR TUBES FLUORESCENTS

Il existe trois types fondamentaux de ballasts pour tubes fluorescents :

- les ballasts magnétiques conventionnels (KVG : konventionelle Vorschaltgeräte) ;
- les ballasts à faible pertes (VVG : verlustarme Vorschaltgeräte) ;
- les ballasts électroniques (EVG : elektronische Vorschaltgeräte).

Leurs caractéristiques de consommation très différentes sont rappelées ci-après.

## ■ Ballasts à faibles pertes (VVG)

Les ballasts à faibles pertes se composent, comme les ballasts conventionnels, d'une bobine magnétique (self) ou d'un enroulement de fil de cuivre autour d'un noyau de fer doux. La conception de ces éléments est toutefois optimisée (réduction des fuites magnétiques) ; ils présentent de ce fait des pertes spécifiques plus faibles que les ballasts conventionnels (5 à 7 W au lieu de 12 à 15 W).

## ■ Ballasts électroniques (EVG)

Outre une réduction importante de consommation, en comparaison des ballasts conventionnels (3 à 5 W au lieu de 12 à 15 W), les ballasts électroniques offrent les avantages suivants :

- amélioration de l'efficacité lumineuse des tubes fluorescents ;
- fonctionnement exempt de scintillement (excitation à plus de 20 kHz) ;
- contrôle continu du flux lumineux (de 0 à 100 %) ;
- augmentation de la durée de vie ;
- facteur de cosinus proche de 1 (pas de correction nécessaire) ;
- utilisation simultanée possible avec deux tubes fluorescents (couplage).

Dans le cas de luminaires bi-tubes, ce dernier point a pour avantage de réduire le surcoût relatif des ballasts électroniques par rapport aux ballasts conventionnels (ballasts KVG et VVG).

La figure 8.1 donne un aperçu de la consommation des différents ballasts par rapport à celle propre aux tubes fluorescents : celle-ci n'est pas négligeable, en particulier, pour ce qui concerne les ballasts conventionnels.

Ballast	Type de tube	Puissance du tube	Pertes du ballast	Consommation totale
magnétique	T 36 W	36 W	10,5 W	46,5 W
à faibles pertes	T 36 W	36 W	6 W	42 W
à très faibles pertes	T 36 W	36 W	4 W	40 W
électronique	T 36 W	36 W	4 W	36 W
magnétique	T 58 W	58 W	15 W	73 W
à faibles pertes	T 58 W	58 W	9 W	67 W
à très faibles pertes	T 58 W	58 W	5,5 W	63,5 W
électronique	T 58 W	58 W	5 W	55 W

Table. 8.1 : Consommation des tubes fluorescents et de leurs appareils auxiliaires (ballasts).

## ■ Interférences radio

Les ballasts électroniques se distinguent par la fréquence extrêmement élevée avec laquelle sont excités les tubes fluorescents (excitation de la décharge électronique). Cette excitation de plusieurs dizaines de kHz



(20 à 40 kHz en général) se traduit par une génération de perturbations électromagnétiques (ondes radio) qui peuvent avoir une influence sur :

- les dispositifs de commande par infrarouge ;
- les dispositifs de recherche de personnes ("beep").

Moyennant une planification soignée et rigoureuse [27], il est toutefois possible d'éviter ces inconvénients.



## 9. CHECKS-LIST

### Points importants du point de vue des économies d'énergie

Critères	Oui	Non
<p>■ <b>Sources</b></p>		
<p>Fait-on appel à des tubes fluorescents de diamètre 26 mm (flux lumineux supérieur) ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>Est-il possible d'utiliser des tubes à 3 bandes ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>Fait-on appel à des lampes à décharge à halogénures métalliques ou à des lampes au sodium haute pression ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>■ <b>Luminaires</b></p>		
<p>Le rendement des luminaires est-il approprié (supérieur à 80 %) ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>Les risques d'encrassement (poussières, salissures) sont-ils importants ? Si oui, peut-on procéder aisément à leur nettoyage ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>Peut-on améliorer les conditions d'éclairage en procédant au remplacement des luminaires ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>Une réduction du niveau d'éclairage général par une nouvelle disposition des luminaires est-elle possible (éclairage de la place de travail) ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>A-t-on fait appel à des appareils auxiliaires de faible consommation (lampes à décharge) ou à des ballasts électroniques (tubes fluorescents) ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>■ <b>Commande</b></p>		
<p>Peut-on réduire la durée d'exploitation de l'installation ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>L'éclairage est-il asservi à la lumière naturelle ou à la présence des occupants ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>A-t-on envisagé une installation de valeur utile comparable, mais moins gourmande en énergie ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>■ <b>Local</b></p>		
<p>Une exploitation accrue de la lumière naturelle est-elle possible</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>Une augmentation du facteur d'utilance du local par un rafraîchissement des locaux (peintures) est-elle possible ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>Le choix des couleurs du local et de la signalisation est-il approprié en termes de bien-être, de sécurité et d'efficacité ?</p>	<input type="checkbox"/>	
<p>Les protections solaires sont-elles efficaces, en particulier pour des ouvertures horizontales ?</p>	<input type="checkbox"/>	



## 10. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Office fédéral des questions conjoncturelles, Installations techniques dans la planification intégrale, Berne, 1986.
- [2] Fördergemeinschaft Gutes Licht, Informationshefte zur Lichtanwendung, Francfort.
- [3] Office des constructions fédérales, Energiegerechte Neubauten, Berne, 1981.
- [4] Bänziger R., Economiser de l'électricité en s'éclairant, Programme d'impulsions installations techniques, 1987.
- [5] SLG, Handbuch für Beleuchtung, Ecomed-Fachverlag, Landsberg, 1992.
- [6] SLG, Zeitgemässe Beleuchtung in Industrie und Gewerbe, brochure de séminaire, Berne, 1990.
- [7] "Travail de nuit", New England Journal of Medecine, numéro 322, page 1253.
- [8] Piazza A., Eclairage de l'Office central fédéral des imprimés et du matériel à Berne, RAVEL 22.51c, Bienne, 1992.
- [9] Sommer J., Loef C., Fensterlose Industriebauten, Wilhelm Goldmann Verlag GmbH, Munich, 1972.
- [10] Institut fédéral pour la protection des travailleurs, Farbe am Arbeitsplatz, Dortmund, 1992.
- [11] Vögeli F., Beleuchtung und Farbgestaltung im Industriebetrieb, Verlag Paul Haupt, Berne.
- [12] SLG, Wegleitung für die Wahl von Fluoreszenzlampen und Betriebssystemen, documentation No 2550/92, Berne, 1992.
- [13] Gütermann A., Thermische Messungen am Stahllager Kägi, AMENA, Schlieren, 1990.
- [14] Frieling H., Licht und Farbe am Arbeitsplatz, Verlagsgemeinschaft für Wirtschaftspublizistik, Bad Wörishofen, 1982.
- [15] Irens A.N., "Light and Productivity", Trans. Illum. Eng. Soc., Vol. 25 No 2, London, 1960.
- [16] Sommer J., "Arbeitsleistung und Beleuchtung", Arbeit und Leistung, 23ème année, numéro 7/8, 1969.
- [17] Herbst C.-H., "Der Einfluss des Lichtes auf den arbeitenden Menschen", Elektrizität, numéro 11, pages 284-300, Francfort, 1968.
- [18] Institut allemand de l'éclairage, Einfluss der Beleuchtung auf die Arbeit an der Schreibmaschine, communication no 13, Wiesbaden, 1970.
- [19] Benz C., Gestalten der Sehbedingungen am Arbeitsplatz, TÜV Rheinland, Cologne, 1983.
- [20] Harmann, Optimale Beleuchtung am Arbeitsplatz, Kiehl Verlag GmbH, Ludwigshafen, 1977.
- [21] Weis B., Not-Beleuchtung, Plaum-Verlag, Munich, 1985.
- [22] Institut fédéral pour la protection des travailleurs et la recherche sur les accidents, Gutachten zur Risikominimierung bei Halleinfahrten, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhafen, 1991.



- [23] Steck B., *Lichttechnik im Betrieb*, Carl Hanser Verlag, Munich, 1969.
- [24] Stenzel, "Kosten des Lampenlichtes in industriellen Betrieben", *Elektrizität*, numéro 10, page 370, 1966.
- [25] Rinza P., Schmitz H., *Nutzwert-Kosten-Analyse, eine Entscheidungshilfe*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [26] Carlsson L, Wibom R., "Lichtverluste in Giessereien", *Internationale Lichtschau*, numéro 2, page 38, 1981.
- [27] OFEN, ATAL, *Ballasts électroniques pour lampes fluorescentes, caractéristiques et données de planification, série de publications de l'Office fédéral de l'énergie, étude no 49*, Office central des imprimés et du matériel, Berne, 1991.
- [28] Grandjean E., "Lumières et couleurs dans l'environnement", dans E. Grandjean, *Précis d'ergonomie*, Editions d'organisations, Paris, 1983.
- [29] OFIAMT, *Hygiène et prévention des accidents dans les entreprises industrielles, Ordonnance 3 relative à la loi sur le travail*, Office central fédéral des imprimés et du matériel, Berne, 1980.
- [30] Woodson W.E., Conover D.W., *L'adaptation de la machine à l'homme, Guide d'ergonomie*, trad. de l'anglais, Editions d'organisations, Paris, 1978.
- [31] Osborne D.J., *Ergonomics at work*, John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [32] *Eclairage des bureaux, Programme d'action RAVEL*, Office Fédéral des Questions Conjoncturelles, Berne 1994.
- [33] *Recommended practice of Daylighting, IES RP-5*, IESNA, New-York NY, USA 1982.
- [34] R. Compagnon, B. Paule, J.-L. Scartezzini, *Etude en éclairage naturel de la nouvelle imprimerie A.B.C. à Schönbühl*, Publication du CUEPE n°48, Université de Genève, 1992.



# 11. REPERTOIRE ALPHABETIQUE

Mot-clé	Page
Accessibilité .....	61
Activation .....	24
Analyse de la valeur utile .....	26
Atténuation du flux lumineux .....	59
Augmentation de la productivité .....	18
Augmentation du rendement .....	73
Ballasts à faibles pertes (VVG) .....	80
Ballasts magnétiques conventionnels (KVG) .....	79
Ballasts électroniques (EVG) .....	80
Capacité de production .....	23
Check-list .....	83
Commande .....	37
Commutation .....	14
Commutation sectorielle .....	14
Conditionnement des locaux .....	74
Consommation d'énergie .....	41
Couleur .....	39
Coût annuel de l'éclairage .....	15
Degré de satisfaction .....	28
Disposition des luminaires .....	74
Distribution de luminance .....	25
Durée de vie .....	65
Durée d'utilisation des locaux .....	13
Ecartement des sources .....	74
Eclairage de secours .....	55
Eclairage de sécurité .....	56
Eclairage des entrées .....	56
Eclairage des places de travail .....	35
Eclairage général .....	35
Eclairement vertical .....	35
Economie d'énergie .....	31
Encrassement .....	59
Entrée des halles .....	56
Entretien .....	61
Fatigue visuelle .....	25
Facteur d'exploitation .....	13
Facteur de lumière du jour .....	46
Fenêtres .....	46
Frais d'exploitation .....	15
Flux lumineux .....	65



Halles borgnes .....	14
Hauteur de la halle .....	33
Heures de service .....	13
Interférences radio .....	80
Intervalle de nettoyage .....	59
Lampes à halogénures métalliques .....	69
Lampes vapeur de sodium haute pression .....	69
Lampes à induction .....	70
Lampes à vapeur de mercure .....	68
Lampes à incandescence .....	67
Lampes fluorescentes compactes .....	67
Lanterneaux .....	46
Longévité .....	70
Lumière naturelle .....	43
Luminaires sur rail .....	73
Maintenance .....	59
Métabolisme .....	24
Mode d'éclairage .....	33
Muscles oculaires .....	25
Optimisation .....	27
Perception visuelle .....	24
Pertes lumineuses .....	74
Planification .....	26
Pondération .....	27
Productivité .....	24
Protections solaires .....	51
Puissance spécifique .....	11
Qualité de l'éclairage .....	26
Régulation .....	38
Remplacement par groupe .....	61
Rendement du luminaire .....	73
Rendu des couleurs .....	41
Rentabilité .....	16
Risques d'accidents .....	24
Sheds .....	47
Sources .....	65
Surfaces d'émission lumineuse .....	74
Surface du local .....	39



Tâches visuelles astreignantes .....	32
Température de couleur .....	66
Tubes fluorescents .....	79
Utilance du local.....	16
Valeur utile .....	27
Zones de circulation.....	35

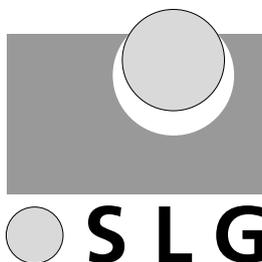
# Associations de soutien

## ASE

Association suisse  
des électriciens

## Sia

Société suisse  
des Ingénieurs et des Architectes



Association suisse de l'éclairage



Union technique suisse

ISBN 3-905233-45-2

Edition originale : ISBN 3-905233-49-5