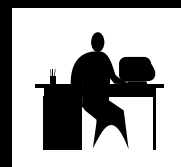




éclairage

Éclairage des bureaux



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

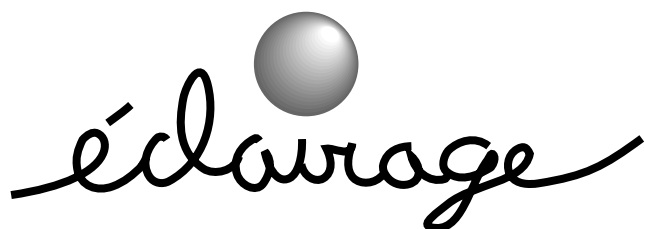
Eclairage des bureaux

Une partie substantielle de la consommation d'électricité du secteur tertiaire (banques, assurances, administrations) peut être attribuée à l'éclairage des locaux. La fraction, représentée par cette partie, dépend principalement du type d'activités qui s'y déroulent: elle est comprise généralement entre 20% (centre informatique, par exemple) et 80% (bibliothèque, librairie). Le coût élevé de l'électricité, ainsi que la sauvegarde de notre environnement et la préservation des ressources énergétiques, nous incitent aujourd'hui à réduire cette consommation.

Le manuel donne un aperçu des techniques d'éclairage naturel et artificiel qui permettent d'atteindre cet objectif. Des exemples de réalisation, illustrent ces dernières, et montrent que des économies importantes d'électricité peuvent être réalisées, en particulier, lors de rénovations d'installations anciennes (plus de 2/3 de la consommation annuelle). Des «check-list» complètent cette ouvrage; elles sont destinées à guider le praticien, désirant appliquer ces nouvelles techniques à des projets concrets.

ISBN 3-905233-44-4

1994, 108 pages
N° de commande 724.329.2f



Éclairage des bureaux



■ **Direction de projet:**

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

■ **Conception et élaboration:**

B. Paule, architecte DPLG, CUEPE/Université de Genève

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

■ **Rédaction:**

W. Lips, ergonome, CNA, Lucerne

J. Lausset, Ch. Perrottet, éclairagistes,

Ch. Perrottet Ing.-Conseils SA, Epalinges

B. Paule, architecte DPLG, CUEPE/Université de Genève

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

Dr. S. Simos, architecte, EIG, Genève

■ **Dactylographie:**

S. Riser, secrétaire, CUEPE/Université de Genève

■ **Crédit photographique:**

Baudocu, CNA, CUEPE/UNIGE, LESO-PB/EPFL, Régent, Ch. Perrottet Ing.-Conseils, Zumtöbel.

■ **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

ISBN 3-905233-44-4

Copyright © 1994 Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, janvier 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 724.329.2f)

Form 724.329.2f 2.94 750



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
- 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 récents 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 concer-



nés. 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. H. Kneubühler
Directeur suppléant de l'Office
fédéral des questions
conjoncturelles



TABLE DES MATIÈRES

■	Introduction	7
■	1. Ergonomie visuelle appliquée au travail de bureau	11
1.1	Exigences concernant le travail sur écran	13
1.2	Exigences propres aux autres activités de bureau	20
■	2. Techniques d'éclairage naturel	23
2.1	Considérations générales	25
2.2	Les matériaux et la lumière	26
2.3	Étude de quelques systèmes d'ouverture	33
2.4	Outils de décision	45
2.5	Exemple de réalisation	54
■	3. Techniques d'éclairage artificiel	59
3.1	Le bureau et les zones	61
3.2	Objectifs de l'éclairage artificiel	61
3.3	Critères et paramètres d'un projet d'éclairage	63
3.4	Modes d'éclairage artificiel	64
3.5	Commande de l'éclairage	75
3.6	Exemples de réalisation	78
■	4. Évaluation globale du projet d'éclairage	87
4.1	Démarche générale	89
4.2	Coûts d'investissement	90
4.3	Coûts d'exploitation	91
4.4	Économies d'énergie	92
4.3	Retombées secondaires	95
■	5. Checks-list	97
5.1	Check-list «Eclairage naturel»	99
5.2	Check-list «Eclairage artificiel»	101
■	Liste des publications RAVEL	103



Introduction

■ Pourquoi ce manuel ?

Le secteur des services (secteur tertiaire) regroupe un nombre important d'activités différentes, plus généralement connues sous le nom de «travail de bureau» (banques, assurances, administrations). Ce dernier est responsable d'une part importante de la consommation nationale d'électricité (23.7 % en 1989), en augmentation constante ces dix dernières années (2.3 % par an en moyenne).

Une partie substantielle de la consommation d'électricité de ce secteur peut être attribuée à l'éclairage des locaux. Dans un bâtiment donné, cette fraction dépend principalement du type d'activité qui s'y déroule: elle est généralement comprise entre 20 % (centre informatique) et 80 % (bibliothèque, librairie). Le coût relatif élevé de l'électricité est une des raisons qui doit nous inciter à modérer et à réduire cette consommation. De nos jours, s'y ajoutent des raisons plus impérieuses, telles que la sauvegarde de notre environnement et la préservation des ressources énergétiques.



Fig. 0.1: Éclairage direct/indirect, par lampadaires mobiles et appliques d'appoint, dans un local de bureaux (gestion et administration)



Caractéristiques du projet

Local:	Bureau paysagé
Affectation:	Gestion et administration (travail à l'écran)
Photométrie:	Local vitré, profondeur 5-12 m (classe 2 SIA 380/4); facteurs de réflexion supérieurs aux valeurs limites (plafond: 0.7, parois: 0.5, sol: 0.3)
Mode d'éclairage:	Direct/indirect par lampadaires mobiles et appliques d'appoint
Prestations:	400-600 Lux au poste de travail
Sources:	Tubes fluorescents à ballasts électroniques HF (1 x PL 24W en appliques, 2 x TL 55W sur lampadaires)
Luminaires:	Lampadaires Trilux 3E
Commande:	Par commutateur général pour l'éclairage ambiant (appliques PL 24 W et 1 tube TL 55 W); par allumage individuel pour l'appoint (1 x TL 55 W par poste de travail)
Puissance installée:	9.5 W/m ² (éclairage à la tâche et appoint)
Économies d'énergie:	Jusqu'à 60 % d'économies potentielles par rapport à une installation d'éclairage indirect conventionnelle (lampes halogènes)

Des techniques d'éclairage nouvelles (voir figure 0.1) permettent à la fois de satisfaire les critères usuels d'appréciation d'un projet d'éclairage (ergonomie et esthétique), tout en réduisant substantiellement la consommation d'électricité de l'installation par rapport à une approche conventionnelle. L'exemple de réalisation, illustré à la figure 0.1, donne un aperçu de ce qui doit constituer, aujourd'hui, un nouvel objectif pour les concepteurs en éclairage.

La mise en forme des connaissances, qui permettent d'atteindre cet objectif, constituent l'essence de ce manuel.

■ Que vise se manuel ?

Le but de ce document est de donner un aperçu des méthodes, permettant de réduire la consommation d'électricité des installations d'éclairage de bureau (secteur tertiaire). Les méthodes en question couvrent un large champ, qui englobe des problèmes d'ergonomie visuelle (confort visuel), d'architecture (esthétique) et d'énergétique du bâtiment (consommation d'énergie). Elles comprennent à la fois des techniques d'éclairage naturel (utilisation intensive de la lumière du jour), d'éclairage artificiel (sources et luminaires à haut rende-



ment) et des solutions permettant d'intégrer ces deux aspects de l'éclairage dans un projet (outils de décision, commandes de l'éclairage).

Ce manuel se veut suffisamment pratique pour permettre aux acteurs de la construction, concernés par ces problèmes (architectes, ingénieurs-conseils, installateurs-électriciens), de mettre en œuvre ces nouvelles techniques. Des exemples de réalisation permettent de visualiser les différentes notions présentées, alors que des «check-list», conçues directement comme outils opérationnels pour la pratique, sont regroupées à la fin du manuel.

Le document est destiné à servir de support au cours de formation continue en éclairage du programme d'action RAVEL (module «Éclairage des bureaux»). Il complète un manuel de base («Éléments d'éclairagisme»), qui expose les notions fondamentales de l'éclairage intérieur de bâtiments, dans le cadre d'un cours d'introduction (module «Introduction»). Deux autres ouvrages sont aussi disponibles: ils concernent l'éclairage de l'industrie et des surfaces de vente.



1. ERGONOMIE VISUELLE APPLIQUÉE AU TRAVAIL DE BUREAU 13

- 1.1 Exigences concernant le travail sur écran 13
- 1.2 Exigences propres aux autres activités de bureau 20



1. ERGONOMIE VISUELLE APPLIQUEE AU TRAVAIL DE BUREAU

L'ergonomie est la discipline qui se préoccupe des conditions psychophysiologiques du travail, ainsi que des relations entre l'Homme et la machine.

En ce qui concerne sa liaison avec les problèmes d'éclairage, il est bon de rappeler que:

«Le traitement des problèmes liés à l'éclairage intérieur ne doit pas se baser uniquement sur les exigences visuelles et les besoins liés à la physiologie du travail. La lumière a également un aspect que l'on pourrait qualifier «d'hygiénique». C'est la combinaison harmonieuse des deux aspects quantitatif et qualitatif de la lumière qui sont susceptibles d'avoir un effet bénéfique sur la santé, définie selon l'OMS non seulement comme une absence de maladie, mais également comme un bien-être à la fois physique, psychique et social (d'après HENTSCHEL, 1972)»

Il ressort de cette citation, encore très actuelle, qu'une approche ergonomique véritable ne peut être que globale et pluridisciplinaire. Elle nécessite en quelque sorte l'intégration de points de vue souvent fondamentalement différents. L'importance réelle de la lumière, dans le cadre du travail de bureau, doit donc être appréhendée par l'analyse systématique de cet ensemble complexe, qu'est le poste de travail.

1.1 EXIGENCES CONCERNANT LE TRAVAIL SUR ÉCRAN

■ Contexte actuel

Il serait bien difficile d'imaginer aujourd'hui notre vie quotidienne, sans l'omniprésence des terminaux à écrans de visualisation (désignés par «écrans» dans la suite du texte). Leur pénétration dans les secteurs



Figure 1.1: Postes de travail à écran de visualisation (dactylographie)



d'activité les plus divers (administrations, banques, télécommunications, transports, etc) a été tout simplement fulgurante: on dénombrait 30 000 écrans en Suisse en 1975, on en compte plus d'un million aujourd'hui [1].

Ces écrans sont généralement affectés à des activités très différentes (voir figure 1.1), les principales étant:

- la dactylographie et la comptabilité;
- la Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO);
- le Dessin Assisté par Ordinateur (DAO).

L'écran est en quelque sorte, un dispositif d'affichage d'informations (voir figure 1.2). Celles-ci sont matérialisées le plus souvent sur un écran cathodique (CRT: Cathode Ray Tube) et, plus récemment, sur un écran à cristaux liquides.

L'écran de visualisation est relié à un ordinateur. La saisie d'informations (données) est généralement effectuée à l'aide d'un clavier (voir figure 1.2) ou d'une «souris».



Fig.1.2: Ecran de visualisation

L'ensemble fait partie du poste de travail, au même titre qu'une table, une chaise et un porte-documents (voir figure 1.1).

Deux genres d'activités à l'écran peuvent être distinguées, en raison de leurs exigences différentes:

- l'entrée des données;
- le travail en mode conversationnel.

L'encadré suivant résume les caractéristiques principales de ces deux genres d'activités.



Principales caractéristiques des activités d'entrée de données et du travail en mode conversationnel

Entrée de données

- Travail généralement monotone, nécessitant une grande capacité de concentration.
- Posture et position de la tête rigide (mise à contribution de l'appareil de soutien).
- Regard le plus souvent fixé sur le document, passage fugitif à l'écran.
- Charge visuelle principalement due à la mauvaise lisibilité des documents et à une éventuelle brillance du plan de travail.

Travail en mode conversationnel

- Travail varié, nécessitant une grande capacité de concentration, d'assimilation et de rédaction.
- Tendance plus faible aux postures forcées.
- Regard généralement fixé sur l'écran (entrée et sortie des informations).
- Charge visuelle principalement due à la lecture de l'écran.

Particularités du travail sur écran

Le travail sur écran se distingue du travail de bureau traditionnel sur les points essentiels suivants:

- l'information est généralement affichée dans un plan vertical (au lieu d'un plan horizontal);
- les caractères typographiques sont encore très souvent représentés en clair sur fond sombre (voir figure 1.3);

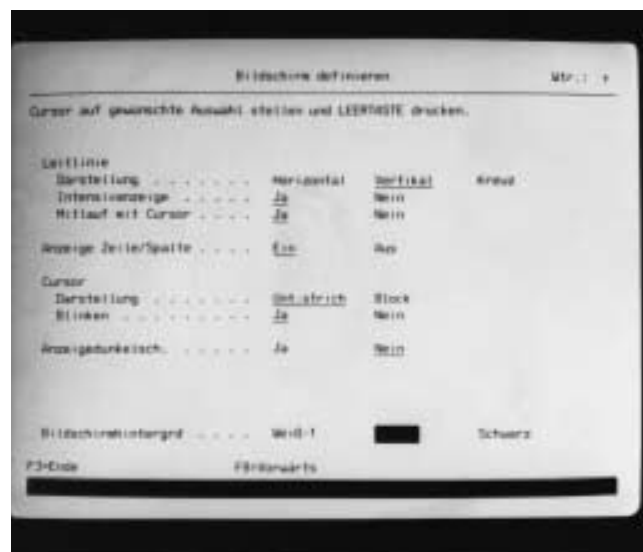
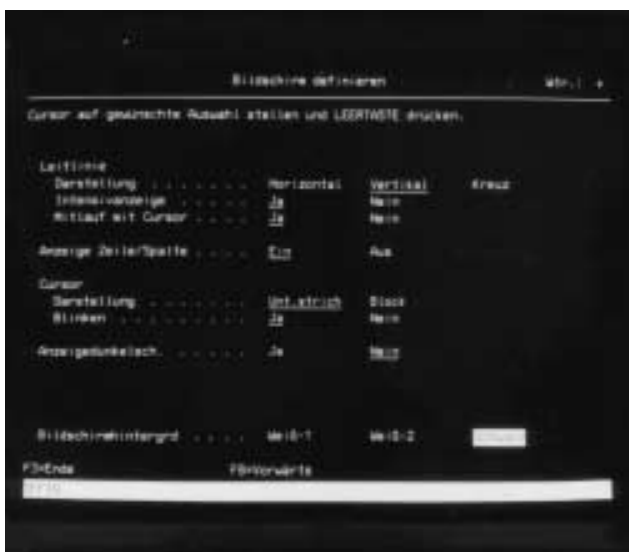


Fig. 1.3: Représentation des caractères typographiques sur écran: contraste normal (à droite) et contraste inversé (à gauche). Le contraste inversé sollicite généralement plus le système visuel (risque de reflets, augmentation de la charge visuelle d'adaptation).



- le champ visuel est limité par la posture assise et la position fixe de l'écran;
- le flux rapide d'information, ainsi que les temps d'attentes inévitables, sollicitent considérablement le système nerveux central.

L'appareil visuel est, sans conteste, celui qui dans son ensemble est le plus fortement mis à contribution par le travail à l'écran. Diverses plaintes sont généralement formulées (maux de tête, brûlures des yeux, larmoiements, etc); celles-ci ne se distinguent pas fondamentalement de celles engendrées par un travail de bureau conventionnel, mais elles sont plus fréquentes. Elles s'expliquent en partie par la charge intellectuelle accrue du travail sur écran (abaissement du seuil de tolérance) ou par des difficultés d'ordre psychologique dues à des formes nouvelles de travail et d'organisation (passage à l'informatique).

Certains troubles oculaires ont toutefois pour origine spécifique la charge visuelle importante due au travail sur écran, résultant généralement des facteurs suivants:

- exigences accrues en matière d'accommodation et d'adaptation (distances et intensités lumineuses variant constamment);
- éblouissements direct et indirect (lumières, réflexions sur l'écran);
- forme inappropriée de certains caractères;
- manque de netteté et de contraste des caractères;
- scintillement de l'écran.

Les progrès techniques, en matière d'écran de visualisation, ont permis de maîtriser certains de ces facteurs. La table suivante résume, à ce propos, les principales caractéristiques auxquelles doivent satisfaire ces derniers du point de vue de l'ergonomie visuelle.

Paramètre	Configuration optimale	Effet principal
Ecran		
Dimension	Adaptée au poste de travail	Caractères lisibles dans toute la zone de travail
Courbure	Écran aussi plat que possible	Diminution des reflets provenant des sources lumineuses environnantes
Mobilité	Inclinable et orientable, déplaçable horizontalement et verticalement	Positionnement optimal en fonction des exigences du travail
Boîtier	Surfaces mates de couleur neutre	Luminances du boîtier comprises entre celle du fond de l'écran et du document
Surface vitrée	Traitement de la surface par filtres polarisants.	Élimination des reflets, sans atténuation des caractères
Symboles		
Représentation	Positive (caractère foncé sur fond clair) avec fréquence de renouvellement de l'image élevée (90 Hz)	Réduction de la charge visuelle d'adaptation (rapport de luminances «écran/document» réduit, absence de scintillement)
Contraste	Rapport de luminances «caractère/écran» compris entre 6 et 10 (luminance des caractères: 100 cd/m ²)	Lisibilité satisfaisante, absence de fatigue visuelle
Couleur	Teintes pastel claires (écran)	Réduction de la charge visuelle d'accommodation (pas de couleurs pures)
Dimension	Hauteur minimale des caractères: 3-4 mm (distance de vision: 60-80 cm)	Lecture aisée (dimension angulaire: 25')
Proportion	Rapport largeur/hauteur compris entre 3 et 4 (épaisseur du trait: 15% de la hauteur; espace: 15-20%)	Lisibilité maximale
Stabilité	Fréquence de balayage élevée, temps de rémanence approprié	Absence de scintillement

Figure 1.4: Caractéristiques techniques optimales des écrans de visualisation



■ Aménagement du poste de travail à écran

Toutes les composantes du poste de travail sur écran revêtent une importance en terme d'ergonomie visuelle. Il faut distinguer toutefois les problèmes liés à l'éclairage des locaux, de ceux dépendant de la disposition de l'écran au poste de travail. Ces divers points sont passés rapidement en revue ci-après.

■ Éclairage

Deux tâches principales, aux exigences opposées en matière d'éclairage, doivent pouvoir être menées à bien à un poste de travail muni d'un écran de visualisation:

- lire le document et le clavier (requiert un éclairage horizontal important);
- prendre connaissance de l'information affichée à l'écran (requiert un éclairage vertical minimal, de manière à obtenir un maximum de contraste entre caractères et écran).

Les dispositions optimales en ce qui concerne l'éclairage sont, en conséquence, les suivantes:

- éclairage horizontal compris entre 300 et 500 Lux (luminance du document: 80-150 cd / m²);
- éclairage vertical compris entre 100 et 200 Lux (luminance des caractères: 100 cd / m²).

Des niveaux d'éclairage plus importants (jusqu'à 1000 Lux horizontal) ne sont admissibles que pour de courtes durées.

■ Répartition des luminances

Des valeurs de luminances très différentes sollicitent particulièrement le système visuel (mécanisme d'adaptation). Il est donc souhaitable



Rapport de luminances	Gauche	Droite
entre l'écran et le document	1: 3	1: 50
entre l'écran et le bureau	1: 5	1: 25
entre l'écran et le fond	1: 15	1: 400

Fig. 1.5: Bonne (gauche) et mauvaise répartition (droite) des luminances au poste de travail à écran de visualisation. Les rapports de luminances correspondants sont reportés dans le tableau.



que le rapport des luminances dans la zone de travail (champ visuel) soit modéré [2,4-6]:

- dans l'ergorama (cf. chap. 1, «Éléments d'éclairagisme»), ce dernier ne doit pas dépasser le rapport 1:3;
- dans le panorama, celui-ci ne doit pas dépasser le rapport 1:10;
- dans l'ensemble du local, le rapport des luminances minimales et maximales doit être inférieur à 1:40.

Ces critères concernent plus particulièrement la luminance des objets suivants:

- l'écran et le document;
- le fond de l'écran et le document.

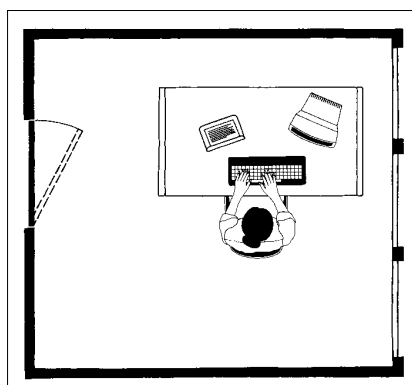
La figure 1.5 illustre deux situations opposées du point de vue de la distribution des luminances: la première est satisfaisante, la seconde est inappropriée.

■ Lumière naturelle

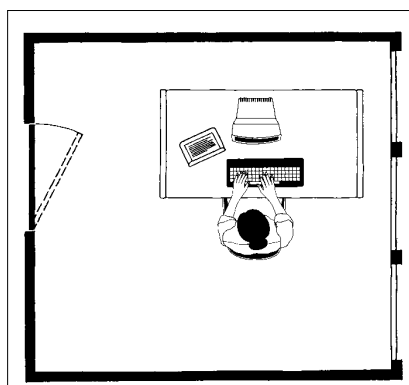
Le niveau d'éclairage dû à la lumière du jour est sujet à de fortes variations (plus de 20'000 Lux à proximité des fenêtres). La lumière naturelle pose donc un problème tout particulier, en ce qui concerne les postes de travail à écran de visualisation. Il convient, en conséquence, de tenir compte des points suivants:

- aucune fenêtre ne doit se trouver devant ou derrière l'écran;
- l'axe principal du regard doit être parallèle aux fenêtres;
- les écrans de visualisation doivent être placés dans les zones éloignées des fenêtres;
- les fenêtres doivent être équipées de protection solaires extérieures, efficaces sur le plan du confort thermique et visuel (stores à lamelles par ex.);
- les fenêtres, munies de protections solaires extérieures insatisfaisantes, doivent être équipées de rideaux intérieurs en toile (stores californiens);
- les rideaux intérieurs doivent être en tissu serré, uni et clair (teintes pastelles).

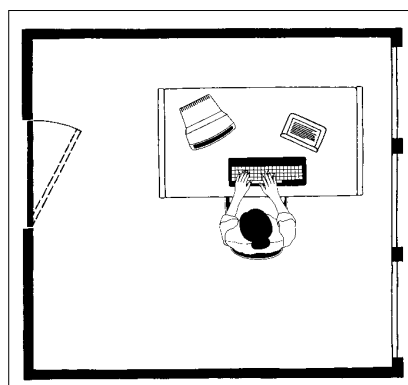
La figure 1.6 illustre quelques dispositions d'écrans de visualisation dans un local éclairé par la lumière du jour. La configuration optimale est celle qui permet de réduire le contraste de luminances dans le champ visuel de l'utilisateur (écran, fond).



Mauvaise: les fenêtres sont dans le champ visuel, grandes différences de luminance



Bonne: différences de luminance équilibrées, par de surfaces lumineuses dans la zone de réflexion de l'écran



Mauvaise: les fenêtres se reflètent à la surface de l'écran

Fig. 1.6: Disposition de l'écran de visualisation dans un local éclairé par la lumière du jour



■ Éclairage artificiel

Les luminaires doivent être disposés de façon à éviter le plus possible les reflets à la surface de l'écran (voir figure 1.7).

Le choix de ces derniers, ainsi que leur disposition, permet de réaliser cela. Les solutions concrètes sont les suivantes:

- adopter des luminaires pourvus de grilles ou de lamelles paralumes appropriées en cas d'éclairage direct (voir figure 1.8);
- placer les luminaires en rangées parallèles aux fenêtres (voir figure 1.9);
- positionner ces derniers selon un angle d'au moins 30° au-dessus du niveau des yeux (luminance apparente du luminaire inférieure à 200 cd / m² pour un usager en position de travail);
- utiliser une stratégie d'éclairage indirect (murs et plafond de couleur claire);
- utiliser des sources de teinte «blanc neutre» ou «blanc chaud».



Fig. 1.7: Réflexions de différents luminaires sur un écran de visualisation



Figure 1.8: Comparaison d'un luminaire spécial pour postes de travail à écran (BAP, «dark light») avec un luminaire à grille conventionnel. La luminance du second est excessive.



La figure 1.9 représente la configuration optimale d'un système de fenêtres (protection solaire, rideau intérieur), de l'éclairage artificiel (rangées parallèles aux fenêtres) et de la disposition des postes de travail (axe principal du regard parallèle aux fenêtres).

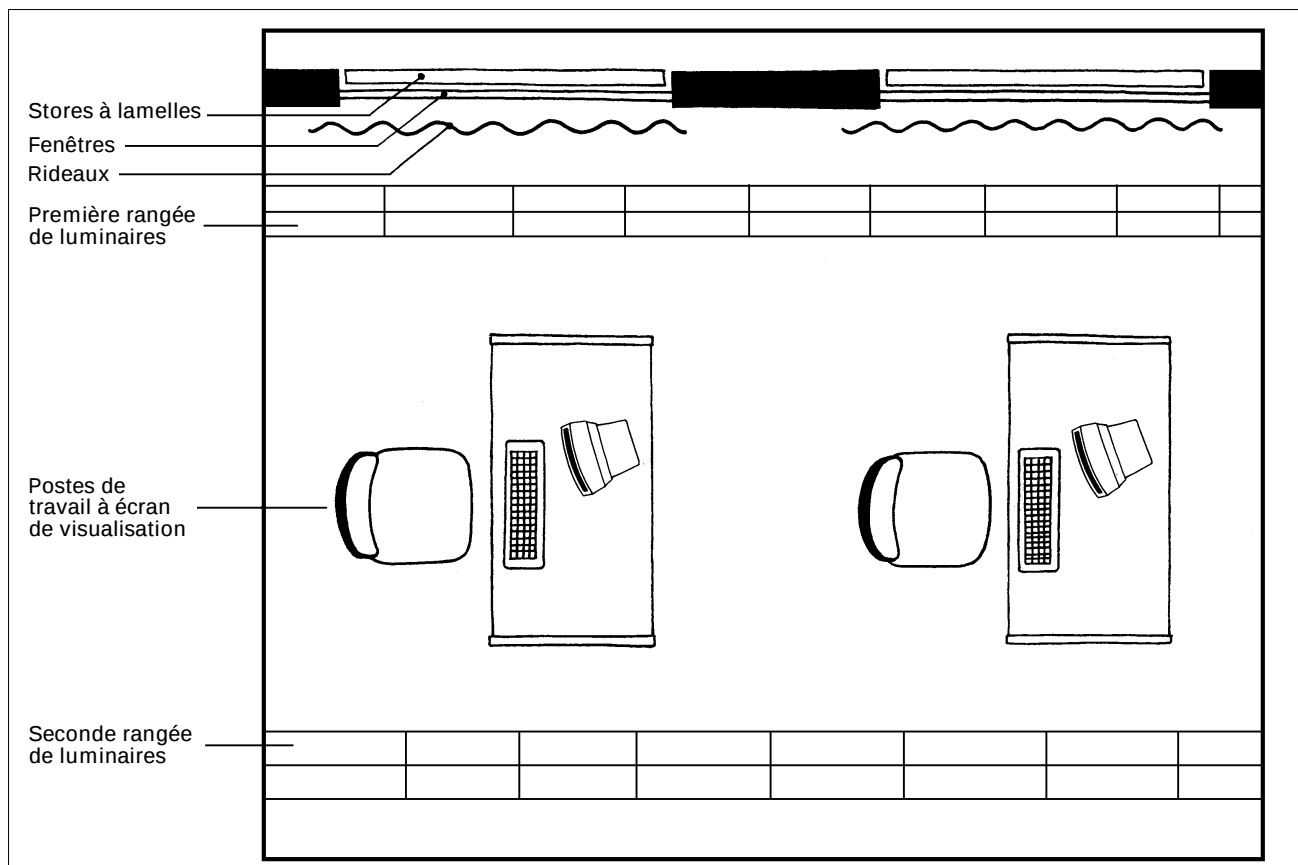


Fig. 1.9: Configuration optimale des postes de travail, du système de fenêtres et de l'éclairage artificiel.

1.2 EXIGENCES PROPRES AUX AUTRES ACTIVITÉS DE BUREAU

Les principales activités de bureau, ne nécessitant pas forcément l'utilisation d'un écran de visualisation, sont:

- la lecture et l'écriture;
- le dessin.

Les exigences en matière d'éclairage, propres à ces activités, sont basées sur les considérations suivantes:

- ces activités ont lieu dans des plans horizontaux (lecture, écriture, dessin) ou verticaux (armoires, bibliothèques, planches à dessin);
- elles se confinent dans un champ visuel restreint (appoint d'éclairage à la tâche possible);
- les plans de travail horizontaux sont souvent de même hauteur (75 cm);
- le dessin sollicite particulièrement le système visuel (détails de petites dimensions);



Sur cette base, on peut formuler les recommandations regroupées dans l'encadré ci-après:

Recommandations pour les activités de lecture, d'écriture et de dessin

Éclairement

Travaux de bureau courants:	300-500 Lux
(300 Lux en cas de forte contribution de la lumière du jour)	
Dessin technique:	750 Lux

Luminances

Parois:	50 - 100 cd / m ²
Plafond:	100 - 300 cd / m ²
Surface de travail:	100 - 300 cd / m ²

Température de couleur

«Blanc chaud» ou «blanc neutre»

Ces recommandations sont aussi applicables pour les positions obliques de la table à dessin. Il y a lieu, par ailleurs, de s'assurer:

- de l'absence de reflets sur le plan de travail (disposition adéquate des planches par rapport aux luminaires et aux fenêtres, surface matte);
- de l'absence d'ombres prononcées et gênantes (préférence pour des luminaires de grandes dimension).

Les recommandations s'appliquant à ces activités de bureau, ainsi qu'à d'autres, font l'objet de parutions régulières dans des publications officielles [3].



BIBLIOGRAPHIE

- [1] «Le travail à l'écran de visualisation», CNA, 5^e édition, 1991.
- [2] «Handbuch für Beleuchtung», 5. Auflage, SLG, ecomed Fachverlag, 1992.
- [3] Norme SNV 418 912-1, «Eclairage intérieur par la lumière artificielle», Association Suisse des Electriciens, Zurich, 1977.
- [4] «Terminaux à écran de visualisation et hygiène du travail», OMS, Publ. No 99, Genève, 1987.
- [5] «Santé et sécurité dans le travail sur écran de visualisation», BIT, Publ. No 61, 1990.
- [6] E. Grandjean, «Ergonomics in computerized offices», Ed. Taylor et Francis, London, 1987.



2. TECHNIQUES D'ÉCLAIRAGE NATUREL 25

- 2.1 Considérations générales 25
- 2.2 Les matériaux et la lumière 26
- 2.3 Étude de quelques systèmes d'ouverture 33
- 2.4 Outils de décision 45
- 2.5 Exemple de réalisation 54



2. TECHNIQUES D'ECLAIRAGE NATUREL

2.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Éclairer un local de bureau par la lumière naturelle offre de nombreux avantages, tant du point de vue de l'utilisateur (impact psychophysologique), qu'en ce qui concerne les économies d'énergie. Il n'en reste pas moins que ce choix présente des «risques». L'importance du flux lumineux disponible (qui constitue l'une des qualités primordiales de la lumière naturelle), peut en effet engendrer des problèmes d'éblouissement (contrastes excessifs, reflets, etc).

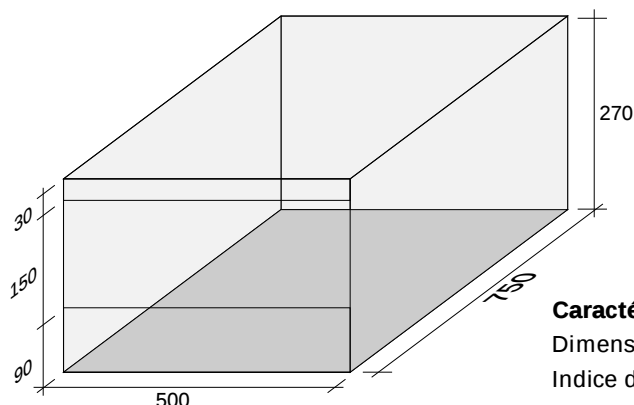
Nous avons vu au premier chapitre («Ergonomie visuelle appliquée au travail de bureau»), que la position et l'orientation du poste de travail doivent prendre en compte la direction de la lumière et la répartition des luminances dans le champ visuel. De ceci, il ressort que quel que soit le local étudié, il est toujours nécessaire de positionner le plan de travail avec précaution, afin d'éviter les situations d'inconfort visuel.

Dans ce chapitre, nous ne reviendrons pas sur la configuration et le positionnement du poste de travail. Nous ferons en quelque sorte abstraction de la notion d'aménagement de bureau, pour insister davantage sur la façon selon laquelle les ouvertures prennent en charge la lumière naturelle; le but est de caractériser les «performances» de ces dernières.

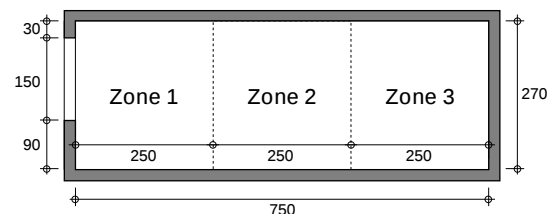
Sous le mot «performances», nous examinerons dans un premier temps la faculté des ouvertures à faire pénétrer la lumière diffuse en profondeur dans un local, et dans un second temps, leur capacité à se protéger contre les effets indésirables du soleil (lumière directe).

LOCAL DE REFERENCE

Axonométrie du local



Coupe du local



Caractéristiques principales

Dimensions : 7.5 x 5 x 2.7m

Indice d'ouverture : 20 %

Photométrie :
 $\rho_{\text{plafond}} = 0.70$
 $\rho_{\text{murs}} = 0.50$
 $\rho_{\text{sol}} = 0.30$

Facteur de lumière du jour : Mesuré sur le plan de travail (0.8m)

Eclairage artificiel : 3 rangées de luminaires parallèles aux fenêtres



Nous passerons pour cela en revue les paramètres d'un local de bureau type, bénéficiant d'une ouverture en façade:

- les matériaux de vitrage;
- les revêtements de paroi;
- les proportions de l'ouverture.

Le local, défini plus haut, est arbitrairement décomposé en trois zones distinctes, afin de mettre en évidence les économies potentielles d'électricité associées à l'utilisation intensive de la lumière naturelle.

Ces évaluations ont été menées à bien à l'aide du programme informatique «ADELINE» [1], pour des conditions d'éclairement correspondant à un ciel couvert uniforme.

2.2 LES MATÉRIAUX ET LA LUMIÈRE

Avant de parler des ouvertures, nous allons tout d'abord faire le point sur l'interaction entre les matériaux et la lumière. Nous passerons ainsi en revue les principaux matériaux assurant le passage de la lumière entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, puis nous parlerons des matériaux de revêtement des parois.

■ Les vitrages

Matériaux transparents

La transparence est une qualité très recherchée, dans la mesure où elle permet un contact visuel direct entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Cette transparence implique que les rayons lumineux ne soient pas massivement déviés ou dispersés en traversant le vitrage. Tout au plus sont ils en partie absorbés ou réfléchis vers l'extérieur.

- Verre clair

Un verre clair de 6 mm d'épaisseur transmet plus de 90% de la lumière ($\tau = 0.92$). Les doubles vitrages isolants possèdent, en moyenne, un facteur de transmission de 84% ($\tau = 0.84$). On notera que les verres sélectifs (miroirs à infrarouge) ne se distinguent plus des verres classiques, du point de vue de la couleur (pas d'altération des couleurs).

- Verre réfléchissant

Il existe sur le marché de nombreux verres et films plastiques réfléchissants (voir figure 2.1). Les premiers ont été largement utilisés ces dernières années dans les nouvelles constructions, tandis que les films sont plutôt destinés aux opérations de rénovations.

Ces deux solutions, souvent utilisées à tort pour réduire les apports solaires, se traduisent par une baisse sensible des niveaux d'éclairement intérieurs. Cette baisse doit généralement être compensée par l'utilisation quasi permanente de l'éclairage artificiel. Le problème de l'excès de chaleur en été reste entier, même pour des façades Est et Ouest. En effet, la part du flux lumineux qui est réfléchi, dépasse rarement 45%. Cela signifie que le facteur de transmission est voisin de 40% ($\tau = 0.4$): la transmission de l'énergie solaire demeure donc trop importante. Par ailleurs, l'atténuation est insuffisante pour éviter l'éblouissement, ce qui rend la présence de stores obligatoire. Pour toutes ces raisons, ce type de vitrage est à déconseiller.



Base de donnée						
Description	T total	T r	T g	T b	T diffus	T direct
V. clair, 4mm	0,933	0,926	0,941	0,920	0,000	0,933
V. float, 3mm	0,927	0,909	0,924	0,904	0,000	0,927
V. float, 6mm	0,922	0,902	0,927	0,907	0,000	0,922
V. granulé, 6mm	0,910	0,902	0,927	0,907	0,358	0,552
V. martelé, 4 mm	0,919	0,918	0,918	0,918	0,181	0,738
V. feuilleté, 8mm	0,908	0,902	0,927	0,907	0,000	0,908
V. armé, 7mm	0,848	0,829	0,892	0,843	0,028	0,820
V. glace armée, 6.5mm	0,819	0,738	0,917	0,795	0,002	0,817
V. Diaplus, 6mm	0,805	0,797	0,811	0,766	0,002	0,803
V. Antélio gris clair 6mm	0,437	0,416	0,459	0,419	0,000	0,424
V. Antélio brun clair 6mm	0,424	0,441	0,429	0,332	0,000	0,424
V. Parsol bronze, 10mm	0,341	0,367	0,358	0,266	0,000	0,341

Figure 2.1: Facteurs de transmission de divers vitrages (y.c. composantes R, G, B)

- Verre teinté

Les verres teintés ont pour propriété d'absorber une partie du flux lumineux. Du point de vue thermique, cette propriété est peu intéressante, dans la mesure où la chaleur n'est pas rejetée, comme dans le cas des vitrages réfléchissants. Le verre s'échauffe et se comporte alors comme un «radiateur», participant ainsi à l'élévation de la température intérieure des locaux.

Parmi les teintes de vitrage les plus couramment utilisées, on trouve le brun et le vert (voir figure 2.1). Les vitrages verts sont partiellement sélectifs, mais créent une ambiance lumineuse «froide». Par temps couvert, les utilisateurs risquent alors de «réchauffer» l'ambiance intérieure, en enclenchant l'éclairage artificiel, (lumière «chaude»).

D'une manière générale, l'utilisation de verres teintés aboutit donc malheureusement à renforcer l'utilisation de l'éclairage artificiel, du fait de la réduction des apports de lumière naturelle.

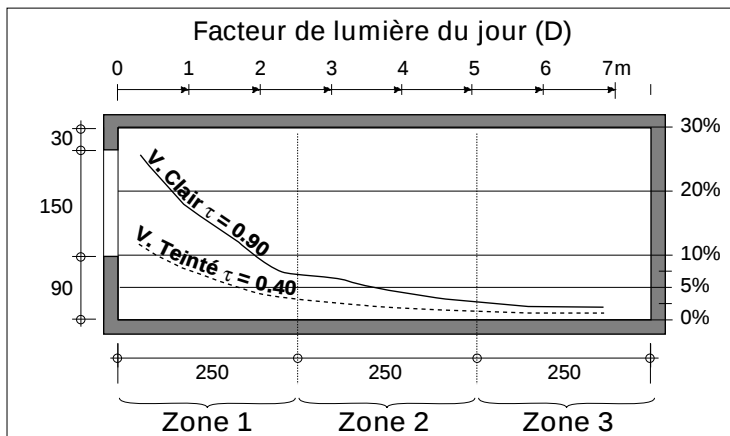
On notera que la coloration de la lumière naturelle reste peu perceptible, donc moins gênante, si tous les verres d'un même local sont identiques. En revanche, la juxtaposition de plusieurs teintes différentes entraîne une confusion et nuit à la perception des couleurs. Par ailleurs, l'utilisation de vitrages verts donne parfois une perception rosée de l'éclairage artificiel (couleur complémentaire).

La figure 2.2 montre l'influence d'un vitrage teinté ou réfléchissant sur la répartition de la lumière à l'intérieur d'un local (facteur de transmission de 40%). On remarque que l'écart entre les facteurs de lumière du jour moyens est très significatif. Les quantités de lumière disponibles en fond de pièce (zone 3) sont presque divisées par trois. Dans cette portion de la pièce, ceci se traduit par une totale dépendance, vis à vis de l'éclairage artificiel.

- Isolation transparente

Les développements les plus récents ont permis la mise au point de produits transparents, dont le pouvoir isolant (pour une épaisseur de quelques centimètres) est comparable à celui de murs opaques isolés (valeur k de 0,7 W/m²K pour une épaisseur de 30mm). Dans le même temps, le facteur de transmission lumineuse reste relativement élevé (voir figure 2.5).

Ces produits, dits «aérogels», ont la particularité de renfermer des «micro» bulles d'air représentant plus de 90% du volume, ce qui explique leur faible conductivité thermique.

**VERRE CLAIR / VERRE TEINTÉ****Influence du facteur de transmission du vitrage****Couverture des besoins**

	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Verre clair	89% (D=15%)	73% (D=4.8%)	28% (D=2.2%)
Verre teinté	82% (D=6.8%)	15% (D=1.8%)	0% (D=1.2%)

Couverture des besoins annuels par la lumière naturelle
(période comprise entre 7h00 et 17h00 en hiver, et 8h00 et 18h00 en été)
(pour un éclairage intérieur requis de 300 lux).

Impact Energétique

Le verre teinté réduit considérablement la couverture des besoins annuels par la lumière naturelle dans les zones 2 et 3 (augmentation substantielle de la consommation d'énergie).

Figure 2.2: Comparaison des performances entre un vitrage clair et un vitrage teinté.

Le diamètre des bulles est inférieur à la longueur d'onde du rayonnement visible: la transparence est donc maintenue. Du fait de son extrême légèreté, ce type de matériau est fragile et nécessite d'être inséré entre deux vitrages.

De nombreux travaux sont menés à ce jour en vue d'obtenir, à des coûts raisonnables, des panneaux de dimension telles que l'on puisse les utiliser dans le bâtiment (actuellement panneaux de 0,20 m X 0,20 m).

Nous verrons plus loin qu'il existe d'autres matériaux dont les performances thermiques et les caractéristiques de mise en œuvre sont voisines: il s'agit toutefois de matériaux translucides.

Matériaux translucides

Il existe un certain nombre de cas pour lesquels on désire tirer profit de la lumière naturelle, tout en supprimant la transparence entre intérieur et extérieur. On parle alors de matériaux diffusants, opalescents ou translucides.

D'une façon générale on relèvera le fait que l'absence totale de transparence est vécue de manière négative par les utilisateurs. On essaiera donc toujours, dans la mesure du possible, de ménager un point de contact visuel direct avec l'extérieur.



Par ailleurs, on notera que le facteur de transmission lumineuse des matériaux diffusants est inférieur à celui des matériaux transparents (valeurs rarement supérieures à 65%). La diffusion de la lumière peut être utilisée pour empêcher les rayons solaires d'arriver directement sur le plan de travail (voir figure 2.3). La lumière est répartie dans toutes les directions. A facteur de transmission identique, le vitrage diffusant tend donc à distribuer plus uniformément la lumière.

Ce type de solution est toutefois délicat et peut même parfois se révéler inopérant. En effet, lorsqu'un matériau translucide est fortement éclairé (soleil), il devient lui même très lumineux et se comporte alors comme une source d'éblouissement.

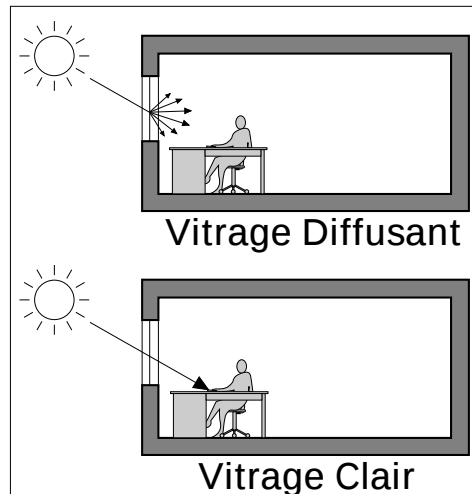


Figure 2.3: Distribution de la lumière par un vitrage diffusant

Il existe une grande variété de produits translucides ou opalescents.

- Produits verriers

Verre dépoli, verre martelé, verre armé; ces matériaux ont les mêmes propriétés thermiques que les verres transparents. Leur utilisation est souvent justifiée par une volonté de «privatisation» ou de sécurité vis-à-vis de l'extérieur. Ils sont moins performants que des vitrages transparents équipés de stores.

- Produits synthétiques

Les matériaux alvéolaires (voir figure 2.4 et 2.6) offrent deux types d'avantages par rapport aux produits verriers:

- Ils possèdent un coefficient d'échange thermique plus faible qu'un double vitrage isolant, puisqu'ils atténuent les pertes de chaleur par convection (le $\approx 1,3\text{W/m}^2\text{K}$ contre 3.2 pour un double vitrage normal).

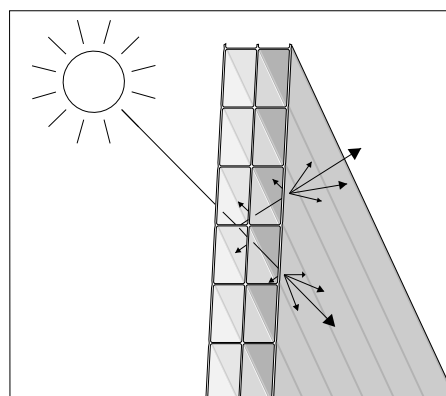


Figure 2.4: Diffusion de la lumière par un matériau alvéolaire.

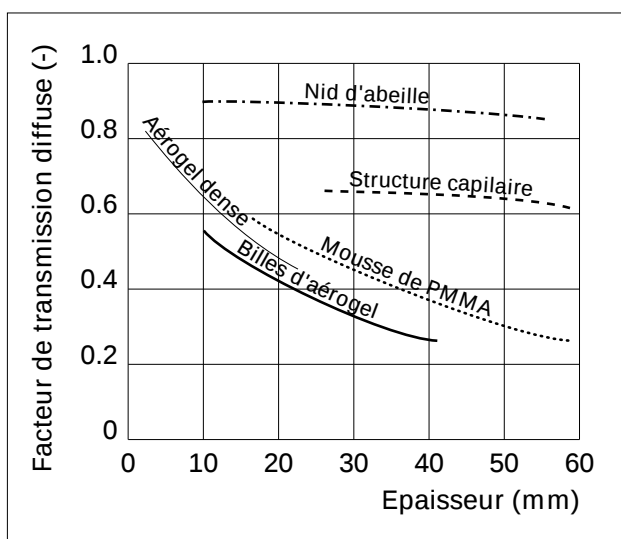


Figure 2.5: Evolution du facteur de transmission diffuse en fonction de l'épaisseur des matériaux d'isolation translucides.

- Ils peuvent, selon la façon dont ils sont mis en œuvre, dévier partiellement la lumière et favoriser ainsi l'éclairement en fond de pièce.
- Isolation translucide

On range, sous cette appellation, des produits «nouveaux», dont la particularité est de transmettre la lumière de façon diffuse, tout en possédant une faible conductibilité thermique. Parmi ceux-ci, citons notamment: la mousse de polyméthilmétacrylate (PMMA), les fibres de verre, le polycarbonate «nid d'abeille», les structures capillaires, les billes d'aérogels.

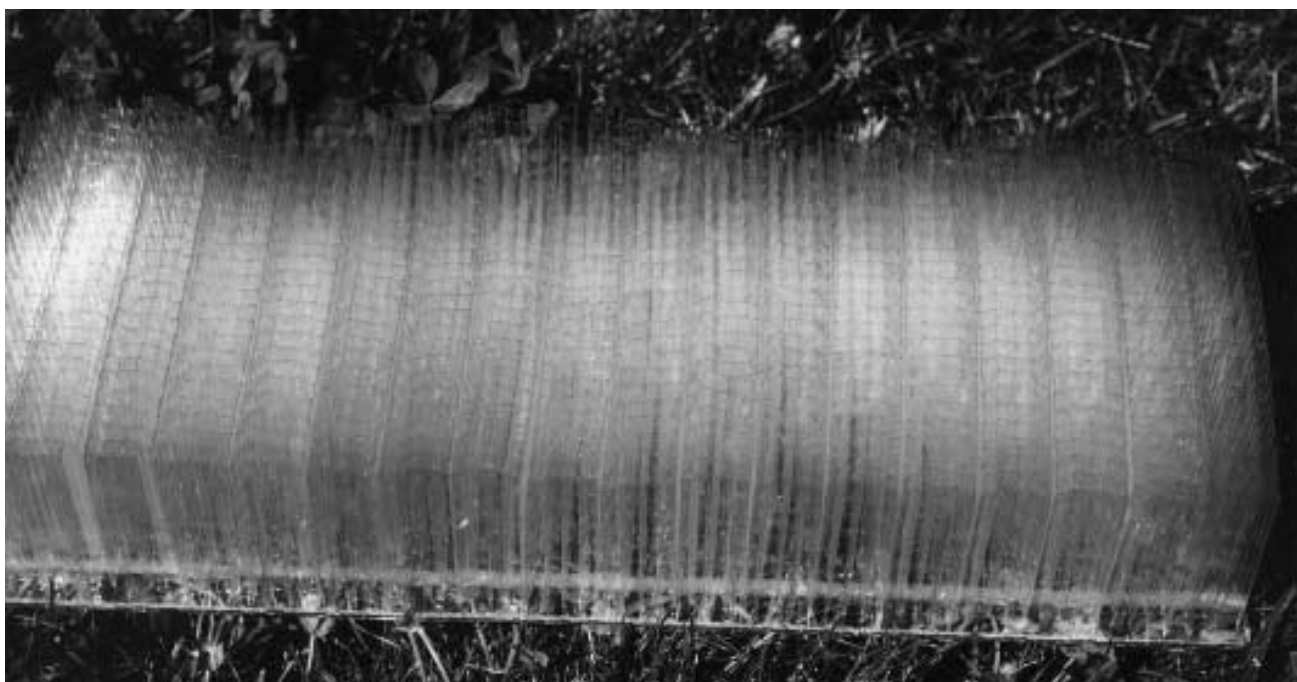


Figure 2.6: Exemple d'isolation translucide.

Leur mise en œuvre implique, comme pour l'isolation transparente citée précédemment, de les protéger entre deux vitrages. La figure 2.5 montre la variation du facteur de transmission de ces différents produits, en fonction de leur épaisseur. A titre indicatif, nous avons reporté les performances de l'isolation transparente (aérogel dense), sur cette même figure.



Les matériaux constitutifs des parois

Facteur de réflexion

Le facteur de réflexion des matériaux constitutifs des parois d'un local joue un rôle très important dans la répartition des niveaux d'éclairement. La figure 2.7 donne, pour le local type, le profil de facteur de lumière du jour, calculé sur le plan de travail, en fonction des facteurs de réflexion des différentes parois :

- La courbe appelée «7-5-3» représente le cas où le facteur de réflexion du plafond est de 70%, celui des murs de 50% et celui du sol de 30%. On considère cette configuration comme une «configuration limite» pour les locaux à usage tertiaire.
- La courbe «7-7-7» représente le cas d'un local dont toutes les parois possèdent un facteur de réflexion égal à 70% : cela correspond à une pièce totalement blanche (facteur de réflexion du plâtre : 70%). Ceci constitue une «configuration cible», qui n'est pas toujours réalisable dans la pratique.
- La courbe «0-0-0» représente le cas d'une pièce entièrement noire, pour laquelle toute la lumière est absorbée par les parois.

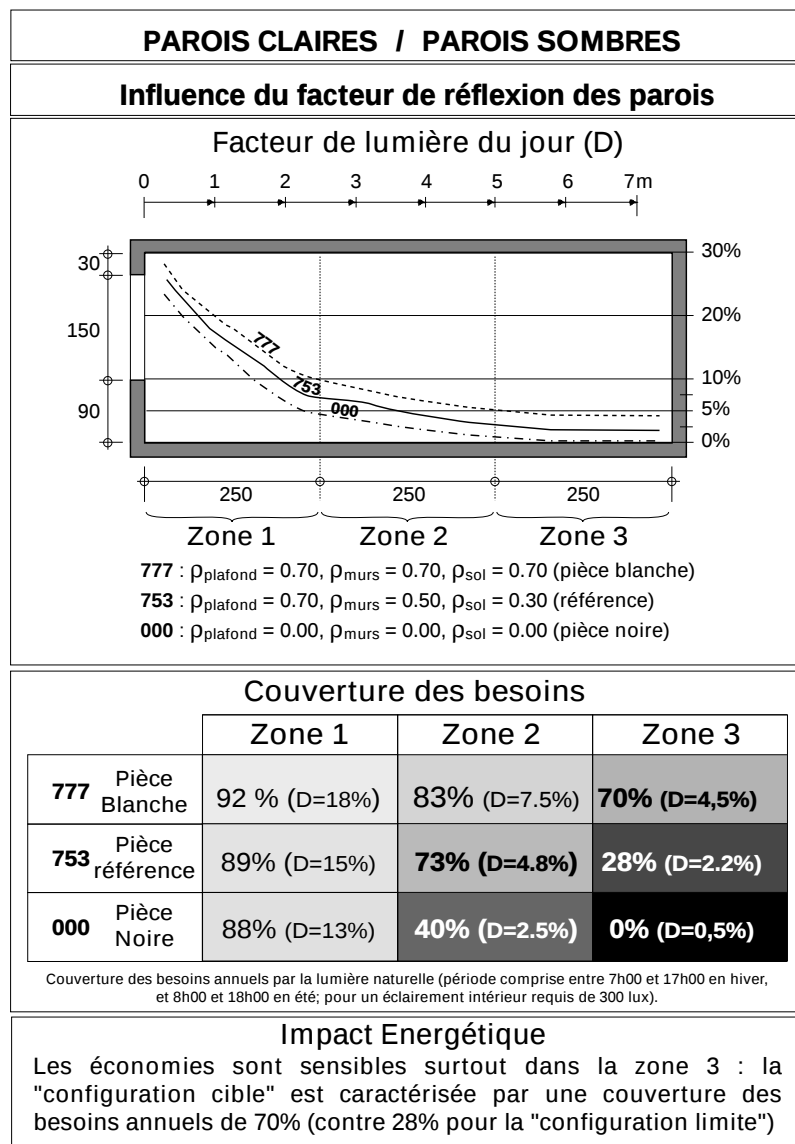


Figure 2.7: Comparaison des performances du local type, en fonction du facteur de réflexion des parois.



Si l'on compare les configurations «7-5-3» et «0-0-0», on s'aperçoit que le facteur de lumière du jour moyen est multiplié par 1,75 dans la zone 1, par 2,28 dans la zone 2, et par 3,66 dans la zone 3. Cela signifie que près des trois quarts de l'éclairement disponible en fond de pièce est dû aux interrélflexions de la lumière sur les parois du local.

Si l'on compare les configurations «7-7-7» et «7-5-3», on s'aperçoit que les quantités de lumières disponibles en fond de pièce sont multipliées par 1.70 (zone 3).

En terme de couverture des besoins lumineux, ces écarts se traduisent par des différences considérables. La zone 3 «gagne» ainsi 70% d'autonomie vis à vis de l'éclairage artificiel, entre les deux configurations extrêmes.

Ces exemples illustrent combien il est important de tenir compte de la photométrie des matériaux de revêtement intérieur des bâtiments. S'il est illusoire de vouloir mettre en œuvre des matériaux uniformément blancs pour toutes les parois, on doit en tout cas se rapprocher de la «configuration cible» (7-7-7), et considérer la «configuration limite» (7-5-3) comme une borne inférieure. A chaque fois que des matériaux plus sombres seront utilisés (notamment pour le sol), cela se traduira par une baisse sensible du niveau de lumière naturelle en fond de pièce, et donc une augmentation de la consommation d'énergie.

Cette remarque vaut aussi pour les revêtements des façades extérieures, notamment en site urbain, et pour les cours intérieures. Pour ces dernières, il est en effet important de favoriser la descente de la lumière jusqu'aux étages inférieurs. Il faut donc réduire l'absorption des rayons lumineux au cours des interrélflexions sur les façades.

Couleur

La teinte de la lumière agit sur le confort des usagers (cf. abaque de Kruithoff, Chap. 3, document «Eléments d'éclairagisme»). On rappellera à ce sujet, qu'à un niveau d'éclairement élevé doit correspondre une température de couleur élevée (vers le bleu), alors qu'à l'inverse un niveau d'éclairement faible nécessite une température de couleur plus faible (vers le rouge).

On veillera donc à ce que les teintes des parois soient de préférence orientées vers le jaune (plutôt que vers le bleu), de façon à ce que l'ambiance lumineuse ne soit pas perçue comme «glauque» ou triste, lorsque les quantités de lumière naturelle disponibles sont faibles (début et fin de journée, ciel couvert hivernal).

A cet égard, les parois directement exposées à la lumière naturelle sont particulièrement visées (parois situées à proximité immédiate de l'ouverture, sol). Cette mesure s'avère particulièrement appropriée dans le cas d'ouvertures ne bénéficiant pas de lumière directe (exposition Nord).



2.3 ÉTUDE DE QUELQUES SYSTEMES D'OUVERTURE

■ Indice d'ouverture

L'indice d'ouverture caractérise, pour un local donné, le rapport entre la surface d'ouverture et la surface au sol; il est exprimé en pour-cent.

Si l'on ne tient compte que de l'éclairage, la tentation est grande d'augmenter la taille des vitrages, afin de profiter au mieux de la lumière disponible à l'extérieur. Nous savons toutefois que les ouvertures constituent les principaux points d'échange thermique entre le bâtiment et l'extérieur. A ce titre, la taille des vitrages influe directement sur les besoins en éclairage, mais aussi sur la demande en chauffage et en climatisation.

La prise en compte de ces trois types de besoins permet de dégager, pour chaque exposition ou orientation, un indice d'ouverture «optimal»; la figure 2.8 donne ces valeurs.

Orientation de l'ouverture	Indice d'ouverture
Sud	25 - 30%
Est / Ouest	20 - 25%
Nord	15 - 20%
Horizontale	10 - 15%

Figure 2.8: Indice d'ouverture recommandé en fonction de l'orientation du vitrage.

Ces valeurs sont indicatives, et doivent donc être manipulées avec précaution, notamment en fonction du climat relatif au site d'implantation. Quoi qu'il en soit, on évitera de les dépasser.

Au delà de l'indice d'ouverture, c'est plutôt de la géométrie de cette ouverture que vont dépendre les «performances» du local vis à vis de la lumière naturelle. Le premier élément d'une bonne gestion de la lumière naturelle repose sur la captation de cette dernière.

Nous insisterons sur cet aspect, dans la mesure où il influe directement sur la géométrie des ouvertures. Après avoir passé en revue les mesures permettant d'augmenter la captation de la lumière diffuse, nous nous intéresserons aux éléments permettant de corriger les éventuels désordres liés à la lumière directe (protection solaire).

La majeure partie des locaux à usage de bureau possèdent des ouvertures en façade, nous mettrons tout d'abord l'accent sur ces dernières. Nous verrons ensuite comment les ouvertures zénithales peuvent être mises à profit dans un certain nombre de cas.

■ Les menuiseries

Après avoir traité les matériaux de vitrages, il convient d'aborder rapidement le problème des menuiseries. D'une manière générale, quel que soit le système d'ouverture adopté, il est important de réduire au minimum la taille de ces dernières. En effet, l'épaisseur de la paroi de l'ouverture peut être traitée de façon à favoriser la pénétration de la lumière naturelle; les menuiseries se comportent toutefois toujours comme des obstacles à cette lumière. La surface des menuiseries peut



représenter jusqu'à 25% de la surface de l'ouverture. Si l'on n'y prend pas garde, les efforts consentis pour augmenter la captation de la lumière naturelle peuvent être fortement réduits par des éléments de menuiserie trop larges.

■ Les ouvertures en façade

L'allège (contrecœur)

- Hauteur de l'allège

La lumière naturelle «utile» provient essentiellement de la partie haute des vitrages. La hauteur du contrecœur n'influe donc pas de façon sensible sur les niveaux d'éclairement en fond de pièce (voir figure 2.9).

Le principal avantage, procuré par une allège de faible hauteur, concerne la possibilité d'augmenter le champ de vision vers le bas. Ceci peut être appréciable, si l'on se trouve au rez-de-chaussée (continuité de l'espace entre intérieur et extérieur).

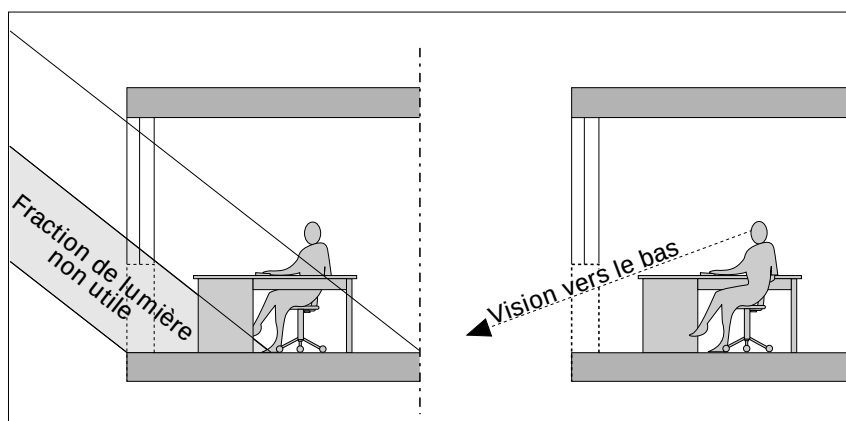


Figure 2.9: Exemple de local sans allège.

Il faut cependant noter qu'un sol extérieur clair, peut atteindre des valeurs de luminance élevées par ciel serein. Les problèmes d'éblouissement peuvent être alors importants. On notera à ce propos, que nous tolérons moins les fortes luminances dans la partie basse du champ visuel, alors que nous sommes habitués à la présence de fortes luminances dans sa partie supérieure (vision du ciel).

En règle générale, indépendamment de toute considération esthétique, chaque fois que l'on voudra réduire la surface de vitrage (aspects thermiques ou financiers), on pourra le faire en augmentant la hauteur de l'allège, sans pour autant nuire à la quantité de lumière disponible en fond de pièce.

- Découpe de l'allège
- Allège basse

La face supérieure de l'allège peut être utilisée pour réfléchir la lumière en direction du plafond (voir figure 2.10). La contribution à l'éclairage de la pièce, sans être très importante, n'est pas pour autant négligeable.

On peut renforcer l'apport fourni de la façon suivante:

- Augmentation de la profondeur de la coudière.
- Mise en œuvre de matériaux favorisant la réflexion de la lumière (peinture claire, aluminium brossé, etc).
- Réduction de la hauteur de la menuiserie.



Par ailleurs, afin d'éviter que les utilisateurs du local ne soient éblouis par la lumière réfléchie, on inclinera la tablette vers l'extérieur d'environ 15° (cf. figure 2.10).

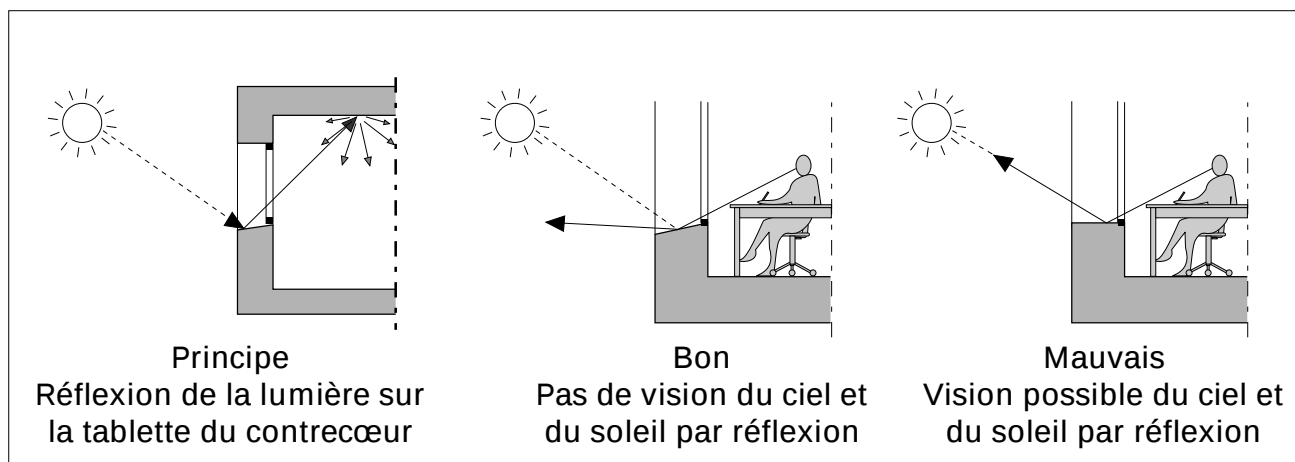


Figure 2.10: Utilisation de la tablette de l'allège comme élément de captation de la lumière naturelle.

- Allège haute

Dans le cas où l'ouverture est située en hauteur, il est opportun de créer un biais dans la tablette intérieure, de façon à favoriser l'entrée de la lumière (voir figure 2.11). Cette mesure peut être très utile dans le cas des locaux semi-enterrés, pour lesquels l'accès à la lumière du jour est constitué d'une ouverture haute.

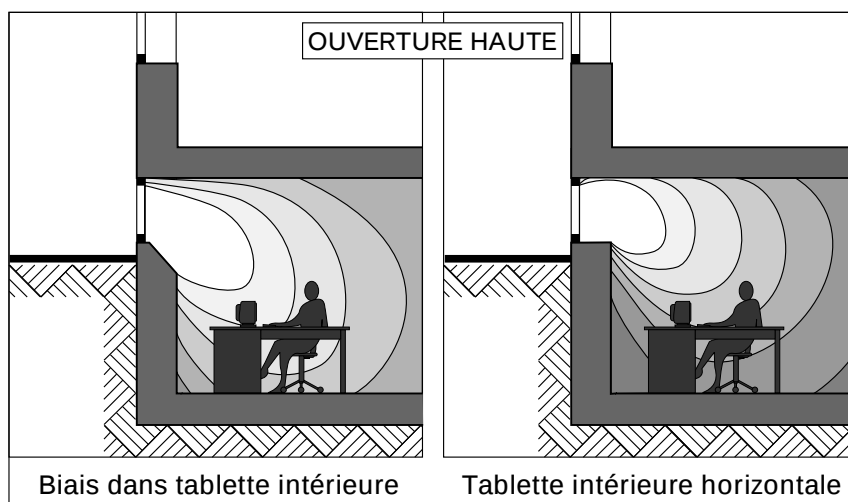


Figure 2.11: Ouverture haute, Création d'un biais dans l'épaisseur du mur.

Le linteau

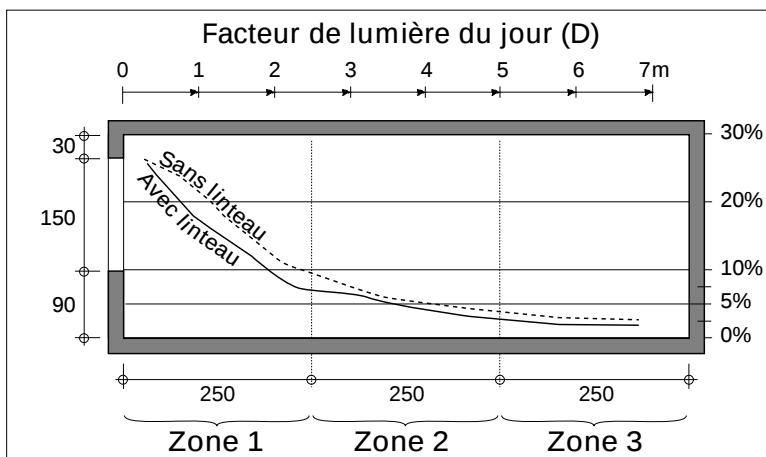
- Retombée du linteau

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, la lumière naturelle «utile» provient essentiellement de la partie haute des vitrages. Ceci est surtout vrai en ce qui concerne l'éclairage en fond de pièce.

Pour cette raison, on cherchera à réduire, dans la mesure du possible, la retombée du linteau par rapport au plafond. La figure 2.12 montre, de façon schématique, l'impact de cette mesure sur la répartition transversale du facteur de lumière du jour et sur la consommation d'énergie.



Influence de la retombée du linteau



Couverture des besoins

	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Sans Linteau	92%(D=18.5%)	80% (D=6%)	51% (D=3.1%)
Avec Linteau	89%(D=15%)	73% (D=4.8%)	28% (D=2.2%)

Couverture des besoins annuels par la lumière naturelle
(période comprise entre 7h00 et 17h00 en hiver, et 8h00 et 18h00 en été)
(pour un éclairage intérieur requis de 300 lux).

Impact Energétique

La suppression du linteau augmente considérablement la couverture des besoins annuels par la lumière naturelle dans la zone 3 (gain de 23%)

Figure 2.12: Influence de la retombée du linteau sur la répartition transversale du facteur de lumière du jour et sur la consommation d'énergie.

• Découpe du linteau

La découpe en biais du linteau est un moyen très efficace de favoriser la pénétration de la lumière dans les locaux (voir figure 2.13). Cette mesure est d'autant plus intéressante que l'épaisseur du mur est importante. Ce principe peut être facilement appliqué à un faux plafond (voir paragraphe 2.5, «Exemple de réalisation»).

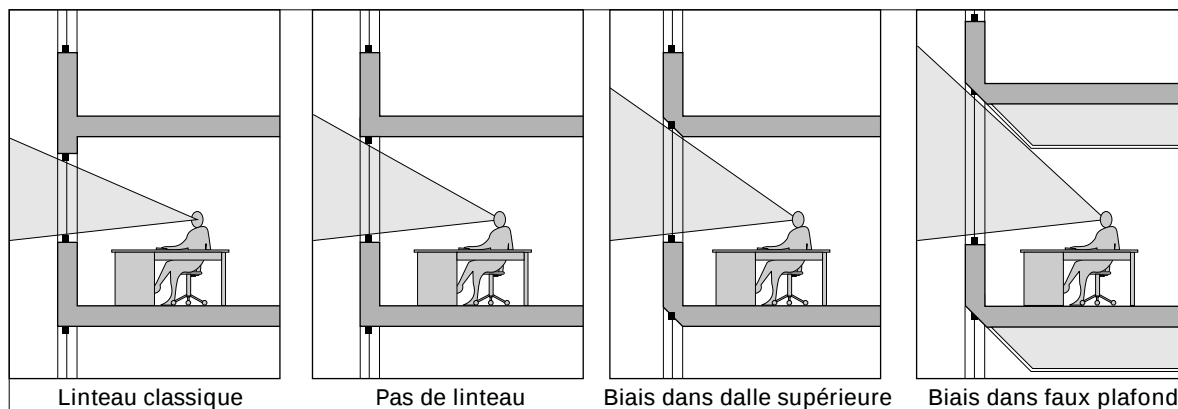


Figure 2.13: Représentation schématique des possibilités offertes par l'agrandissement des ouvertures vers le haut (suppression de la retombée du linteau, création de biais dans la dalle supérieure, ou dans le faux plafond).



Les embrasures

La découpe en biais des embrasures de fenêtre est aussi un moyen d'améliorer la prise en charge de la lumière naturelle (voir figure 2.14). Les avantages, qui en découlent, sont les suivants: Meilleure distribution latérale de la lumière vers l'intérieur.

- Transition plus progressive des niveaux de luminance entre le vitrage et les murs qui encadrent celui-ci.
- Découpe en biais particulièrement intéressante en cas de mur épais ou d'ouverture étroite.

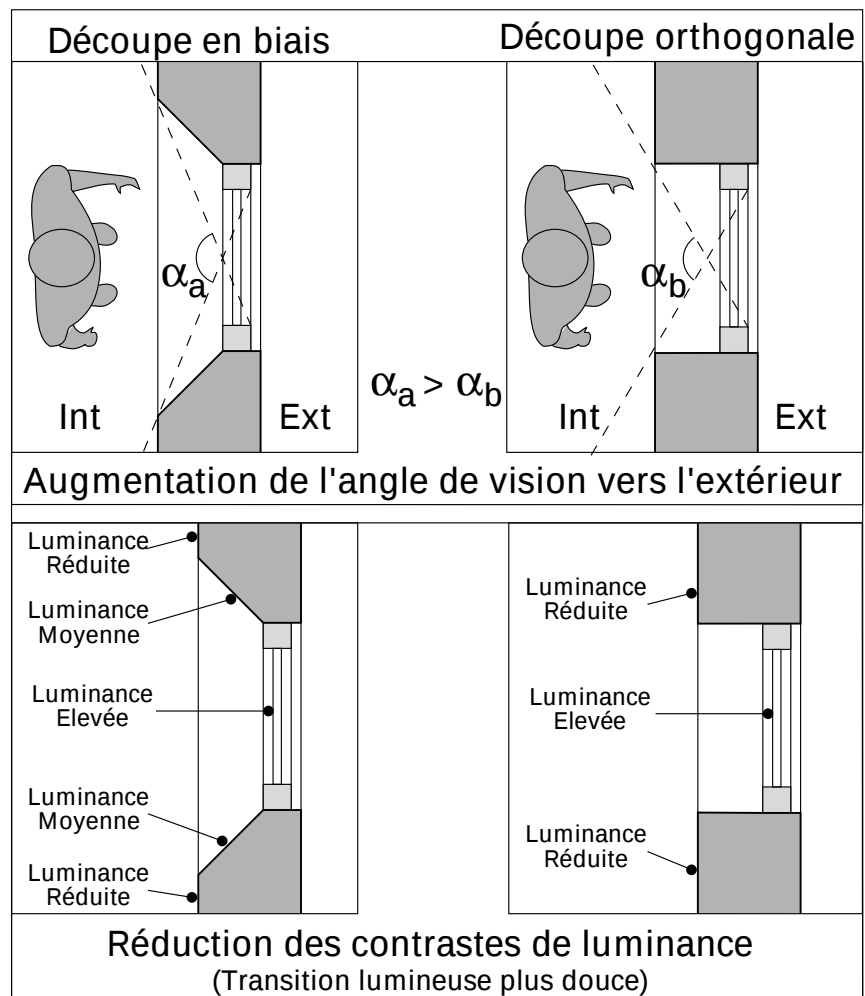


Figure 2.14: Possibilités offertes par la création de biais dans les embrasures de fenêtre.

Le biais peut aussi être réalisé dans la partie extérieure de l'embrasure, ce qui contribue à augmenter «l'angle de vision» de l'ouverture. Dans ce cas, on perd cependant le bénéfice de la transition progressive entre la luminance de la fenêtre et celle des murs.

Les protections solaires

Concernant les ouvertures en façade, on pourra se référer aux paragraphes 2.5 et 4.2 du document «Eléments d'éclairagisme», dans lequel les différents types de protection solaire sont décrits et analysés.



Les bandeaux lumineux (lightshelf)

La figure 2.15 montre le principe de fonctionnement de ce système développé aux Etats-Unis dans les années septante. La lumière est réfléchiée, en direction du plafond, par un plan horizontal ou légèrement incliné, situé dans la partie supérieure du vitrage.

Caractéristiques du bandeau lumineux (lightshelf)

Avantages

- Augmentation des niveaux d'éclairement en fond de pièce.,
- Réduction des niveaux d'éclairement à proximité de l'ouverture.
- Protection solaire efficace en été.
- Protection contre les éblouissements (élimination des taches solaires directes).

Inconvénients

- Pénalisation des apports lumineux par ciel couvert.
- Nécessité de disposer d'une hauteur sous plafond importante (mini 2,70m).
- Problèmes de nettoyage.

Préconisations

- A réserver aux façades Sud.

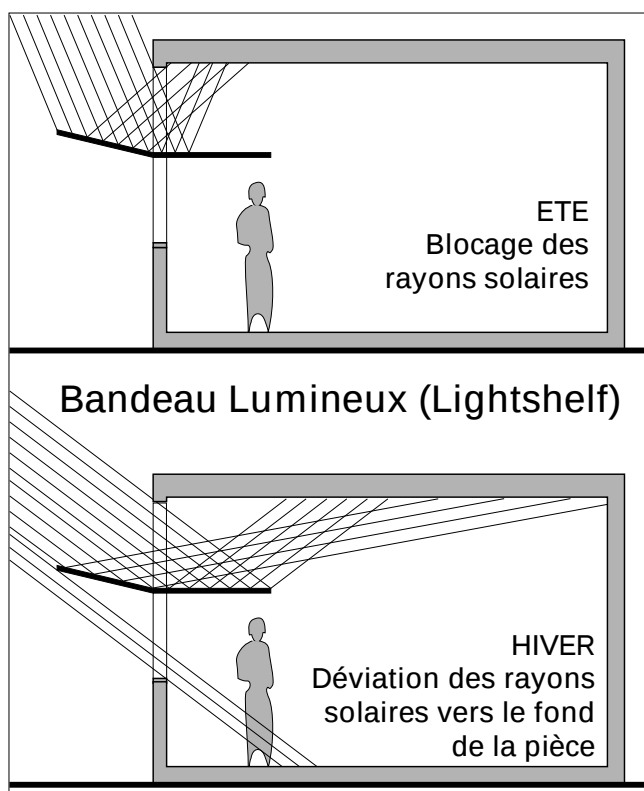


Figure 2.15: Description schématique du principe du bandeau lumineux.



Figure 2.16: Exemple de bandeau lumineux (bâtiment de l'Etat de Californie, Sacramento, USA).

■ Les ouvertures en toiture

Les bureaux qui disposent d'ouvertures en toiture ne représentent qu'une faible part du parc immobilier. Il existe cependant de nombreux cas, pour lesquels il est possible de tirer un parti intéressant de la lumière zénithale.

En premier lieu, on pense à tout les locaux situés au dernier étage des bâtiments. La création d'ouverture dans la toiture peut, en effet, s'avérer très valorisante pour ces espaces. Elle permet de rééquilibrer les niveaux d'éclairement en fond de pièce, au moyen d'un dispositif simple. Par ailleurs, il est possible de créer ponctuellement des «conduits de lumière», afin de desservir à partir de la toiture, des locaux situés à un ou plusieurs niveaux en contrebas.

On distinguera les ouvertures en toiture selon qu'elles présentent un vitrage horizontal ou vertical.

Ouvertures horizontales

Celles-ci sont très efficaces par ciel couvert. Schématiquement, on peut considérer qu'elles sont deux fois plus performantes que des ouvertures verticales, dans la mesure où elles «voient» la totalité de la voûte céleste. Leur comportement vis à vis des pénétrations solaires est par contre peu satisfaisant; ces ouvertures favorisent les apports solaires en été, au détriment de l'hiver. Cela va à l'encontre d'une gestion raisonnable des pénétrations solaires.



- Traitement des costières

Nous avons vu plus haut, que la découpe de l'épaisseur du mur avait une importance primordiale dans les performances des ouvertures en façade; il en va de même pour les ouvertures en toiture. La figure 2.17 montre que la hauteur de la costière, ainsi que sa découpe, influent largement sur la distribution de la lumière à l'intérieur des locaux:

- La hauteur des costières doit être réduite au minimum, afin d'éviter l'absorption de la lumière au cours des interrélflexions.
- L'évasement de la costière vers le bas, permet d'élargir le cône de distribution de la lumière. Cette mesure permet aussi de créer une transition de luminances plus progressive entre le vitrage et la sous face de la toiture.
- D'une manière générale, on traitera les costières avec une couleur claire, de préférence légèrement teintée de jaune ou d'ocre, afin de «réchauffer» la couleur de la lumière.

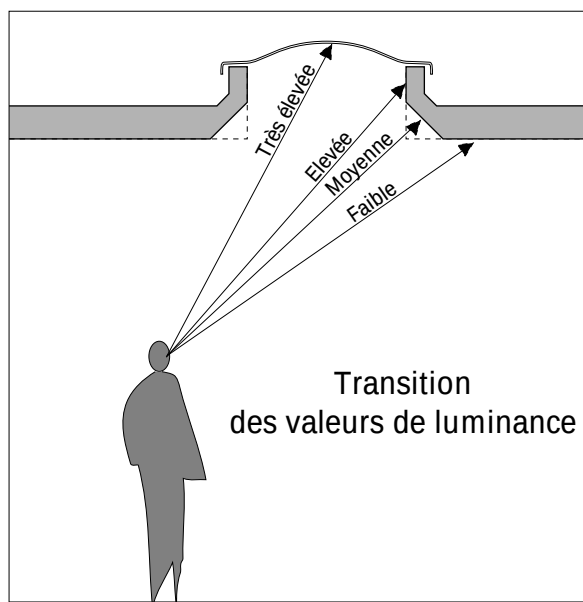


Figure 2.17: Découpe en biais de la toiture sur le pourtour des costières.

- Protections solaires

Quelle que soit le type de protection envisagé, on le positionnera de préférence à l'extérieur, afin d'éviter les surchauffes estivales. Par ailleurs, on prévoira un système d'ouverture - fermeture du «vitrage», afin de pouvoir évacuer la chaleur par convection naturelle.

- Protection fixe (brises-soleil)

C'est le moins coûteux des systèmes, mais c'est aussi le moins performant. Il pénalise en effet les pénétrations de lumière par ciel couvert et n'augmente pas les apports hivernaux.

- Protection mobile (store à lames, stores en tissu)

L'emploi de stores à lames mobiles constitue une solution «luxueuse» très efficace, puisque l'on peut théoriquement s'adapter à toutes les situations. Dans la pratique, ceci n'est pas toujours envisageable du point de vue financier.

L'emploi de stores en tissus est plus réaliste. Un certain nombre de fabricants de cadres et fenêtres proposent d'ailleurs des systèmes d'occultation mobile intégrés. On veillera à ce que le facteur de transmission énergétique du store ne dépasse pas 15%.



Figure 2.18: Exemple d'ouvertures zénithales (Aéroport de Copenhague, Danemark).

- *Protection semi-mobile (ajustement saisonnier)*

Il s'agit d'un compromis offrant de réels avantages, tant en ce qui concerne la gestion des apports solaires, que du point de vue de la maintenance. Schématiquement il s'agit d'un système de lames fixes, montées sur un cadre.

Ce dernier pivote et permet aux lames soit de capter et de dévier la lumière solaire en hiver, soit d'absorber les rayons en été (chaque lame présente deux faces distinctes: une face réfléchissante et une face mate).

Le changement de position est effectué manuellement deux fois par an (aux équinoxes).

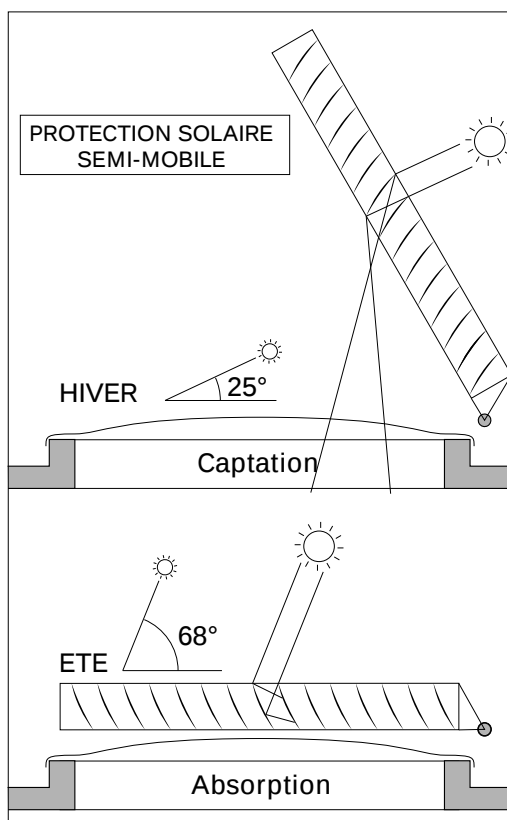


Figure 2.18: Protection solaire semi-mobile (ajustement saisonnier).



Les atrias

Les ouvertures zénithales sont très souvent utilisées pour fournir un appoint lumineux à des espaces autres que ceux auxquels elles sont directement associées: c'est le cas des atrias.

Le problème qui se pose alors, réside dans la difficulté de distribuer la lumière latéralement sur plusieurs étages.

Le plus souvent, on constate que les parois de l'atrium servent de point d'ancrage à des coursives. Celles-ci empêchent la lumière d'accéder aux espaces situés de part et d'autre. Dans ce cas, l'atrium ne fournit pas d'apports lumineux significatifs au bâtiment. Tout au plus offre-t-il l'opportunité de créer une ambiance visuelle agréable.

Recommandations relatives aux atrias

- Dans le but de favoriser la descente de la lumière jusqu'aux étages inférieurs, on donnera à l'atrium une forme en «V» (largeur maximum en haut, rétrécissement en bas).
- On traitera les façades intérieures avec des couleurs claires, afin de limiter l'absorption de la lumière.
- On essaiera de réduire au minimum l'obstacle représenté par les coursives. La figure 2.19 montre un exemple de réalisation pour laquelle la coursive a été positionnée au centre de l'atrium. Cette configuration permet de favoriser les apports lumineux sur les façades intérieures de l'atrium, et de procurer un second jour appréciable aux espaces ainsi desservis.
- Sachant que les quantités de lumière disponibles dans un atrium sont moins importantes que pour une façade donnant directement sur l'extérieur, il convient de surdimensionner les ouvertures donnant sur cet espace, afin de compenser cet effet.

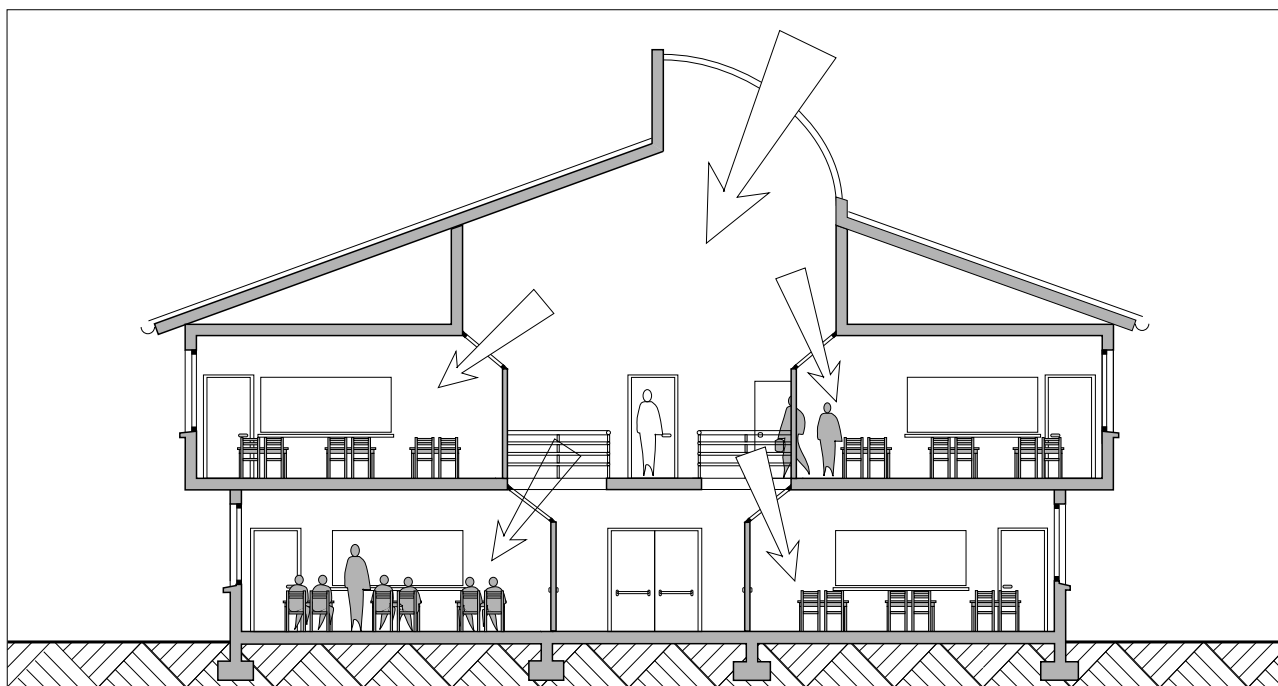


Figure 2.19: Exemple d'atrium avec coursive centrale (CES de Modane, France).



Ouvertures verticales

Lorsqu'elles disposent de vitrages verticaux, les ouvertures en toitures sont généralement orientées au Sud ou au Nord.

- Orientation Sud

Il s'agit de l'orientation la plus favorable en ce qui concerne le gisement lumineux. On a vu par ailleurs que la course solaire favorise la captation de lumière en hiver, tout en limitant les apports estivaux. Concernant les protections solaires, on se retrouve dans le même cas que les ouvertures en façade Sud

- Orientation Nord

Il s'agit de l'orientation la moins «risquée» du point de vue des pénétrations solaires. Les déperditions thermiques sont par contre importantes. Pour cette raison, on préférera utiliser un matériau de type «isolation translucide» (voir paragraphe 2.2), plutôt qu'un double vitrage normal. Sauf cas particulier, on peut considérer qu'un bureau qui comporte une ouverture en toiture orientée au Nord, bénéficiera d'une autre ouverture «mieux exposée». Il est donc envisageable de mettre en œuvre un matériau non transparent (contact vers l'extérieur par l'autre ouverture).

Les cheminées de lumière

De nombreux espaces, du fait de leur position centrale au cœur des bâtiments, n'ont pas d'accès direct sur l'extérieur. Il faut donc que la lumière naturelle traverse d'autres volumes pour parvenir jusqu'à eux. L'exemple des patios exposé précédemment constitue un début de solution.

Une autre voie consiste à créer des conduits dont l'unique but est de faire transiter la lumière à travers les étages. La figure 2.20 montre l'exemple d'une cheminée de lumière, mise en œuvre dans le cadre d'un bâtiment scolaire à Collioure (France). Le système se décompose en deux parties distinctes, qui illustrent la problématique énoncée plus haut:

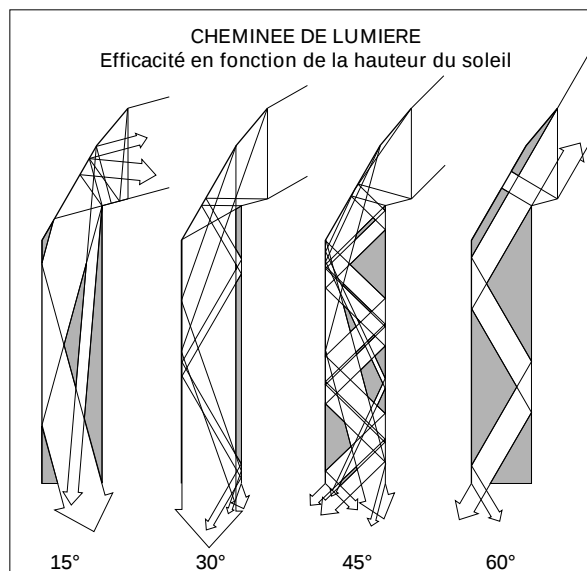


Figure 2.19: Efficacité d'une cheminée de lumière en fonction de la hauteur solaire.

- La partie haute sert à capter la lumière; elle est orientée au Sud. La forme du capteur a été optimisée dans ce cas de façon à favoriser les performances pour une hauteur solaire de 30° (début novembre, mi-février).
- La partie inférieure est un conduit dont les parois sont tapissées de feuilles d'aluminium anodisé (le facteur de réflexion doit être le plus élevé possible afin de limiter les pertes lumineuses par absorption).



Caractéristiques des cheminées de lumière

Avantages

- Présentent des performances intéressantes par ciel serein.
- Valorisent les espaces en les reliant symboliquement avec l'extérieur.
- Facilitent le repérage et l'orientation dans le bâtiment.
- Permettent le développement et la croissance de plantes à proximité immédiate du conduit.

Inconvénients

- Ne permettent pas la pratique d'activités de travail.
- Présentent des performances réduites par ciel couvert.

Préconisations

- Dans la pratique, on veillera à ce que le rapport entre la section du conduit et sa hauteur ne dépasse pas $1/8$. Au delà de cette proportion, les apports deviennent peu significatifs.
- On peut réchauffer la couleur de la lumière en traitant l'une des parois du conduit avec une teinte «champagne».

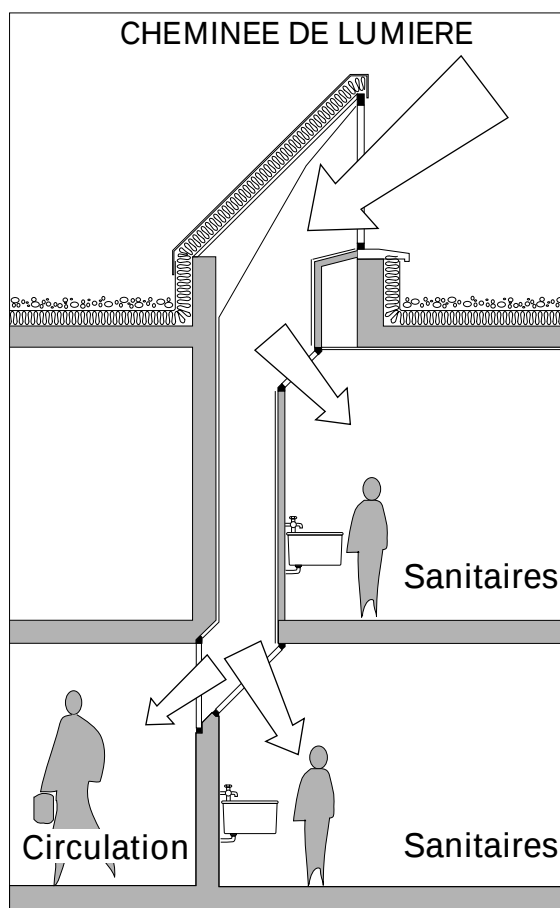


Figure 2.20: Cheminée de lumière, exemple de réalisation (Ecole maternelle de Collioure, France).



2.4 OUTILS DE DÉCISION

Le choix d'un système particulier d'utilisation de la lumière naturelle nécessite généralement l'emploi d'outils de décision. Ces derniers sont de différentes natures et permettent de concevoir et dimensionner ces systèmes:

- sur le plan quantitatif (éclairage, luminances);
- sur le plan qualitatif (ambiances visuelles).

Les principaux outils de décision sont passés en revue ci-après.

■ Abaques

Certains organismes, comme la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), ont développé des méthodes, permettant à l'aide d'abaques, de prévoir le facteur de lumière du jour d'un local en fonction des caractéristiques de l'ouverture (forme, dimension, position) et de l'éloignement par rapport à cette dernière.

Si ces méthodes s'avèrent pratiques et efficaces dans le cas de locaux de forme simple (baies rectangulaires ou carrées, pièces parallélépipédiques), elles sont en revanche inefficaces pour des géométries plus complexes [6,8].

■ Maquettes

Avant toute chose, il convient de préciser que les mécanismes d'inter-réflexion de la lumière ne sont pas sensibles aux phénomènes d'échelle. Cela signifie que l'on peut parfaitement connaître la distribution de la lumière dans un local, en construisant une maquette à échelle réduite, à condition de respecter la photométrie des matériaux devant être mis en œuvre. Le problème le plus complexe réside en fait dans la reproduction de la source de lumière naturelle (position, direction, intensité).

Le principal avantage des maquettes repose sur leur simplicité de réalisation (pratique usuelle de l'architecte).

Méthodes et précautions

- Échelle de la maquette

La taille des maquettes est principalement déterminée par la possibilité de visualiser les ambiances lumineuses intérieures, à l'aide d'une caméra ou d'un appareil photo. Il est en effet impératif de pouvoir effectuer la mise au point de l'objectif sur l'une au moins des parois du local. On utilise en règle générale des objectifs «macro», dont la focale est inférieure à 28 mm. Ceux-ci permettent, en effet, d'obtenir une image nette à une distance très proche et offrent de surcroît un large angle d'ouverture.

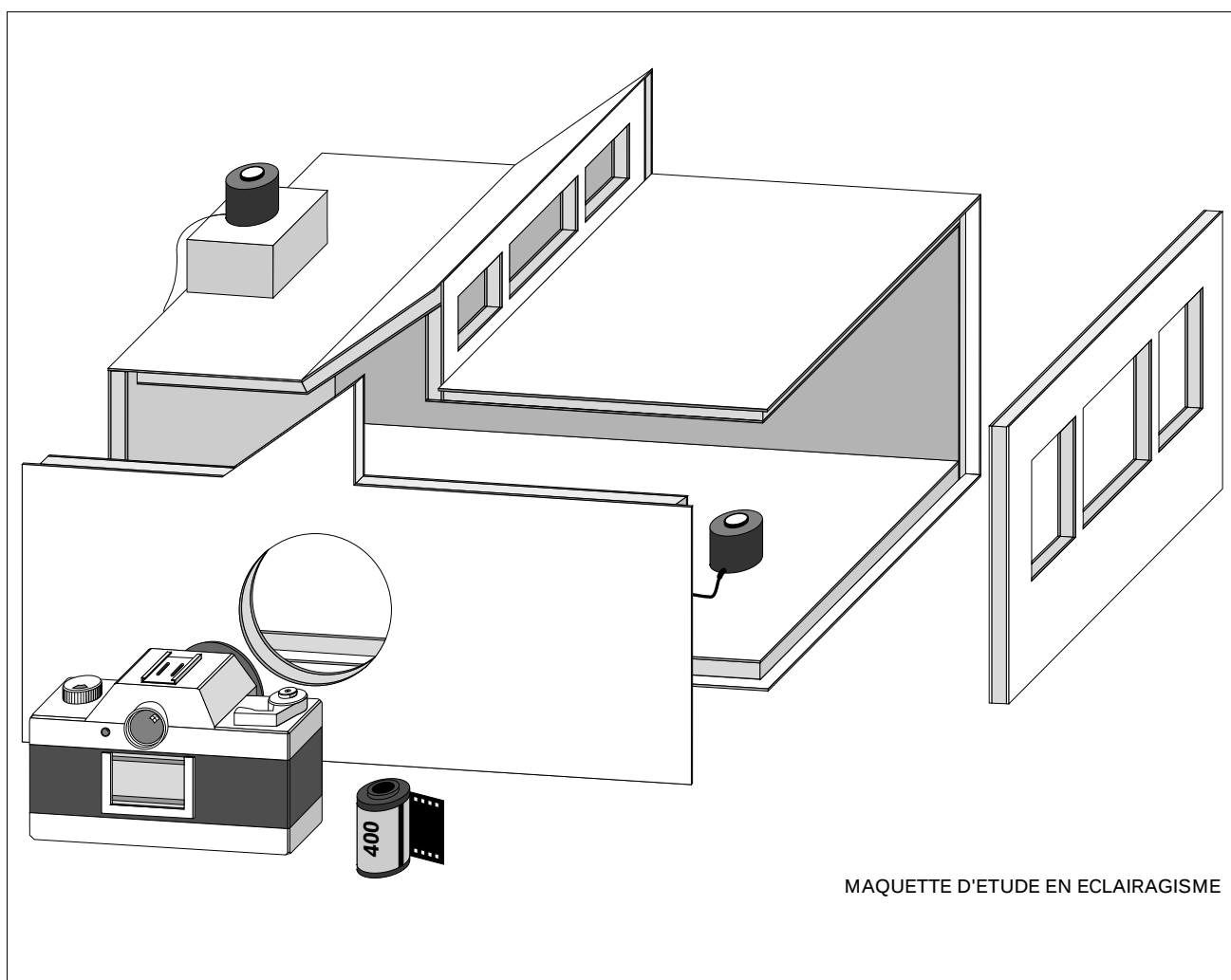
Cela conduit à prévoir une hauteur sous plafond comprise entre 10 et 15 cm et une profondeur de pièce de l'ordre de 30 cm. Pour la majeure partie des bâtiments, cela correspond à une échelle de 1/20^e ou 1/25^e.

- Possibilités d'évolution

Ces maquettes doivent pouvoir être modifiées facilement, afin de favoriser l'étude de différentes variantes (taille des ouvertures, photomé-



trie des parois, etc). La figure 2.21 montre une maquette réalisée à l'aide de «carton-mousse». Ce matériau présente l'avantage de se découper facilement et permet de créer des «chicanes» dans les angles, en jouant sur les différentes couches dont il est constitué (voir figure 2.22). L'assemblage des divers éléments et parois permet d'éviter les moyens de fixation irréversibles, tels que la colle. La pratique montre que l'utilisation d'épingles offre une grande souplesse pour les modifications.



MAQUETTE D'ETUDE EN ECLAIRAGISME

Figure 2.21: Vue d'ensemble d'une maquette en carton-mousse.

En prévision d'une analyse sur héliodon ou sous un ciel artificiel, on cherchera à privilégier les matériaux légers et solides; on s'assurera par ailleurs que les dimensions totales des maquettes n'excèdent pas 1 m par 1 m.

- «Étanchéité» à la lumière

Afin d'éviter de surestimer les éclairagements à l'intérieur des maquettes, on veillera à garantir une bonne «étanchéité» des parois à la lumière. On utilisera donc du carton mousse de un centimètre d'épaisseur et l'on traitera les angles de façon à créer une «chicane», tout en ajoutant un adhésif sur l'extérieur, afin de parfaire l'étanchéité à la lumière (voir figure 2.22).

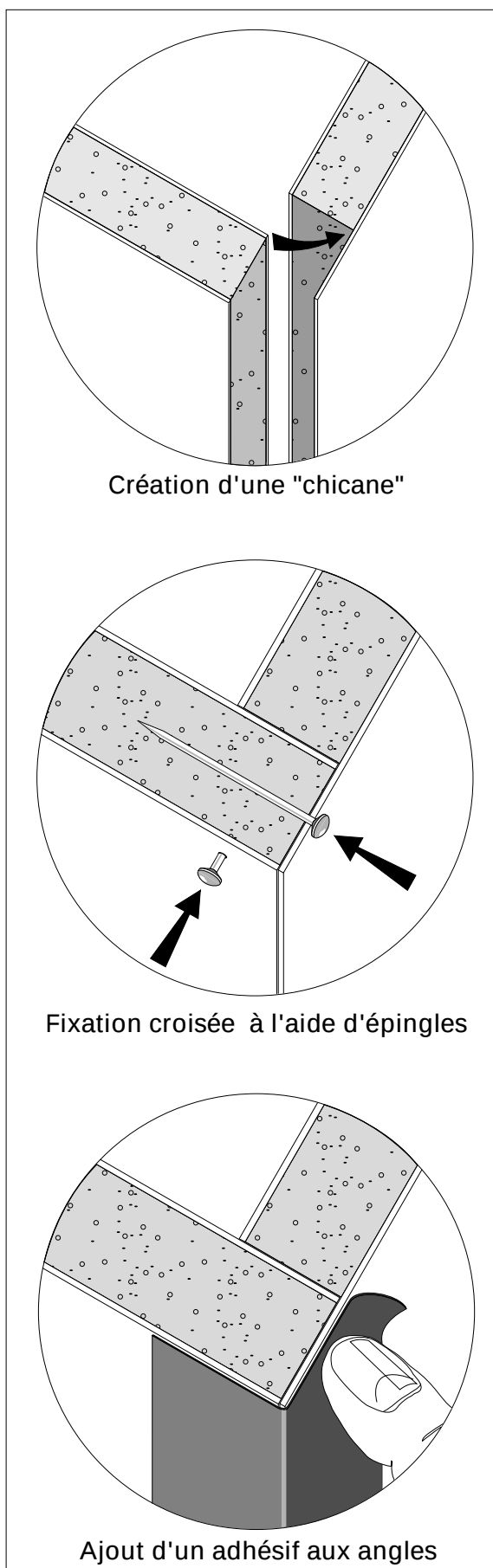


Figure 2.22: Détails d'assemblage (maquettes en carton-mousse).



- Choix des matériaux

Ainsi que nous l'avons évoqué précédemment, il est très important de tenir compte de la photométrie des matériaux de la maquette. Il est en effet impératif pour les parois internes (murs, plancher, plafond), d'utiliser des matériaux (papier, cartons, tissus, etc), dont le facteur de réflexion et la brillance sont le plus proche possible de ceux devant réellement être mis en œuvre (béton, plâtre, peintures, etc).

Mesures

L'utilisation de maquettes offre non seulement la possibilité de visualiser les ambiances lumineuses sur le plan qualitatif, mais permet aussi de quantifier les «performances» d'un local, vis-à-vis de la lumière naturelle. On utilise pour cela des photomètres (luxmètres).

Dans le cas général, on place un de ces luxmètres à l'extérieur de la maquette sur un plan horizontal, afin qu'il puisse servir de référence. Le ou les autres luxmètres sont placés à l'intérieur de la maquette, aux endroits dont on désire plus particulièrement connaître le niveau d'éclairement (la mesure doit être prise à une hauteur correspondant à celle du plan de travail). Il est alors possible de déterminer le facteur de lumière du jour dans le local, de la même façon que dans la réalité (rapport des éclairagements intérieurs et extérieur).

Mesures en extérieur

- Lumière diffuse

L'établissement des facteurs de lumière du jour peut se faire en plaçant la maquette à l'extérieur, à condition que l'on soit en présence d'un ciel parfaitement couvert et uniforme. On vérifiera l'uniformité du ciel en plaçant un luxmètre verticalement et en mesurant l'éclairement en direction des quatre points cardinaux. Si les quatre valeurs ainsi mesurées sont trop disparates (rapport supérieur à 1,5), l'erreur risque d'être importante et les niveaux de facteur de lumière du jour peu représentatifs de la réalité. Il faudra alors s'armer de patience dans l'attente de conditions plus favorables.

- Lumière directe

La visualisation des pénétrations solaires directes peut se faire par ciel clair, en utilisant le «Cadran Solaire Polaire» (voir figure 2.23, se reporter aux instructions jointes). Cet outil permet, avec un minimum de moyens, d'effectuer rapidement des vérifications pour un certain nombre de positions typiques du soleil.

Mesures sous ciel artificiel

L'avantage des ciels artificiels (simulateurs de lumière diffuse) réside dans le fait que ceux-ci permettent de contrôler la distribution de luminances. On distingue en Suisse deux types principaux de ciels artificiels:

- Ciel à miroirs

Il s'agit d'une enceinte dont le plafond est muni d'une multitude de tubes fluorescents, placés derrière des panneaux diffusant, de façon à présenter une luminance uniforme. Les parois de l'enceinte sont tapissées de miroirs, afin de «démultiplier» le ciel et de le prolonger jusqu'à l'horizon.

La distribution des luminances est très proche de celle du ciel couvert CIE (luminance du zénith = trois fois la luminance de l'horizon). La maquette est placée au centre du dispositif; les mesures sont réalisées lorsque le manipulateur est sorti de l'enceinte, afin d'éviter d'interférer avec la lumière réfléchie par les miroirs.



CADRAN SOLAIRE MAQUETTES EN EXTERIEUR

D'après "Sunlighting", W.C. LAM, VNR, 1986.

- Photocopier sur papier bristol, puis découper et plier l'abaque comme indiqué sur le schéma ci-dessous
- Régler la latitude selon le site d'implantation du bâtiment;
- Orienter le Gnomon perpendiculairement au plan de l'abaque
- Fixer l'abaque sur un plan horizontal de la maquette, en tenant compte du Nord,
- Faire pivoter la maquette par rapport au soleil, en repérant le mois et l'heure choisie en fonction de l'ombre portée sur l'abaque par le Gnomon.

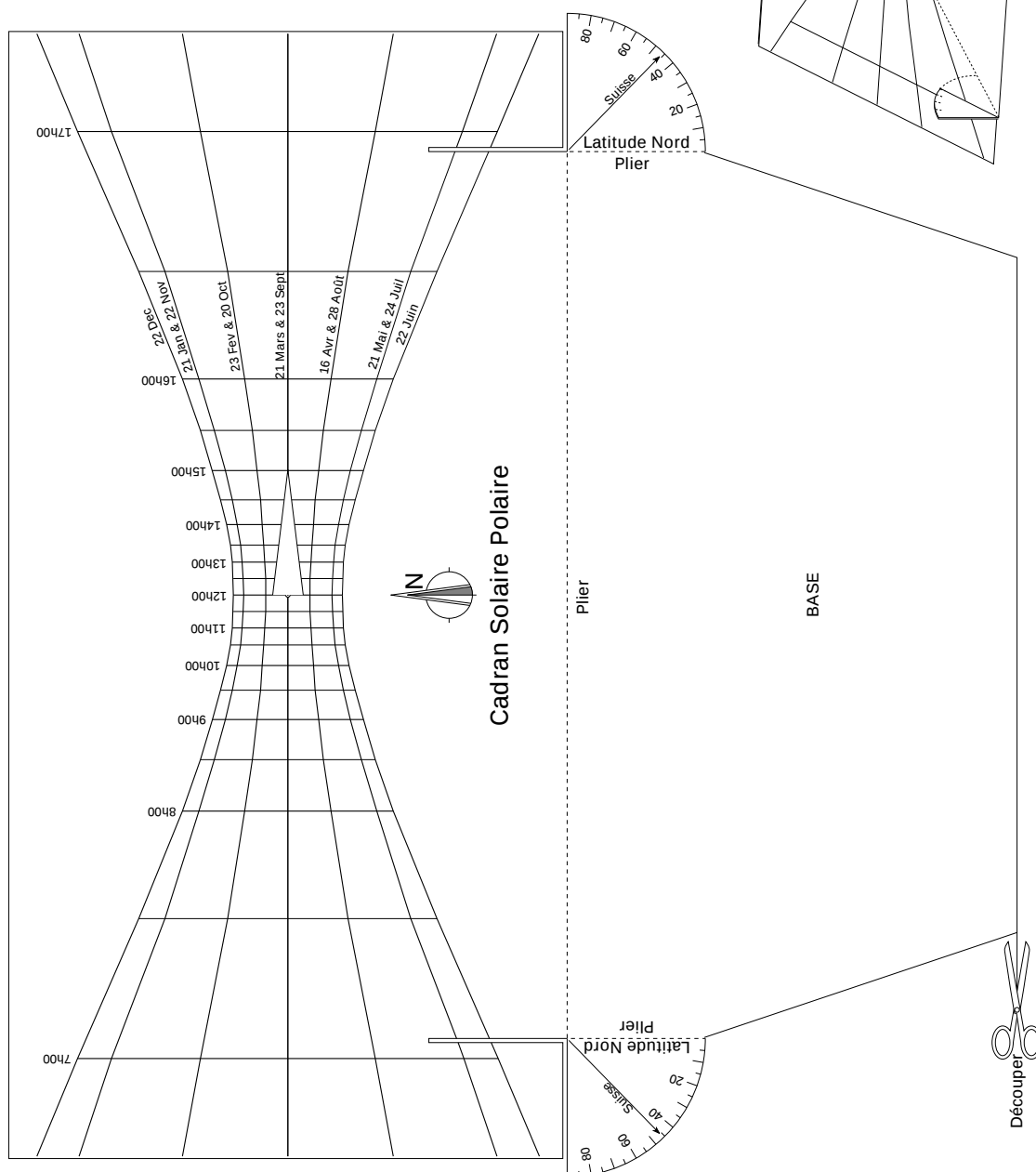


Figure 2.23: Cadran solaire polaire (maquettes placées à l'extérieur).



- Ciel à balayage

Il s'agit d'un hémisphère de 5m de diamètre «pavé» de 145 disques lumineux (voir figure 2.24). Seul un sixième de la voûte céleste est construit (25 disques lumineux); la simulation de l'ensemble de la voûte céleste s'obtient de la manière suivante:

- Rotations successives de la maquette placée au centre du simulateur (angle de rotation de 60 degrés);
- Mesure des composantes de l'éclairement et mémorisation des prises de vues vidéo à chaque rotation;
- Addition des contributions et images successives;
- Obtention de la mesure photométrique globale et de la visualisation finale de l'ambiance lumineuse, après les six mouvements de rotation.

Chaque source lumineuse étant modulable à souhait, cet outil permet donc de reproduire une grande variété de cieux différents.

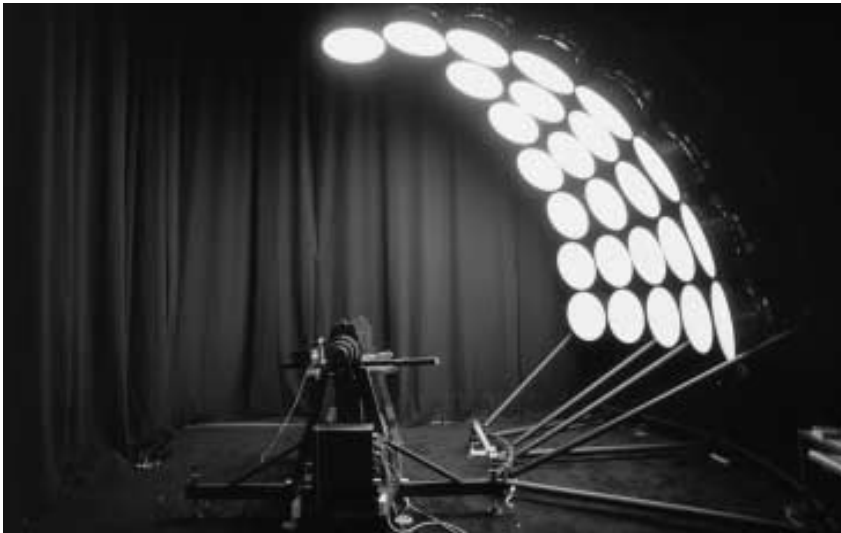


Figure 2.24: Simulateur de lumière diffuse (ciel artificiel à balayage, EPFL).

Mesures sur héliodon

L'héliodon (simulateur de lumière directe) permet de reproduire les déplacements du soleil dans le ciel, quels que soient l'heure, le jour de l'année ou la latitude du lieu considéré (voir figure 2.25).

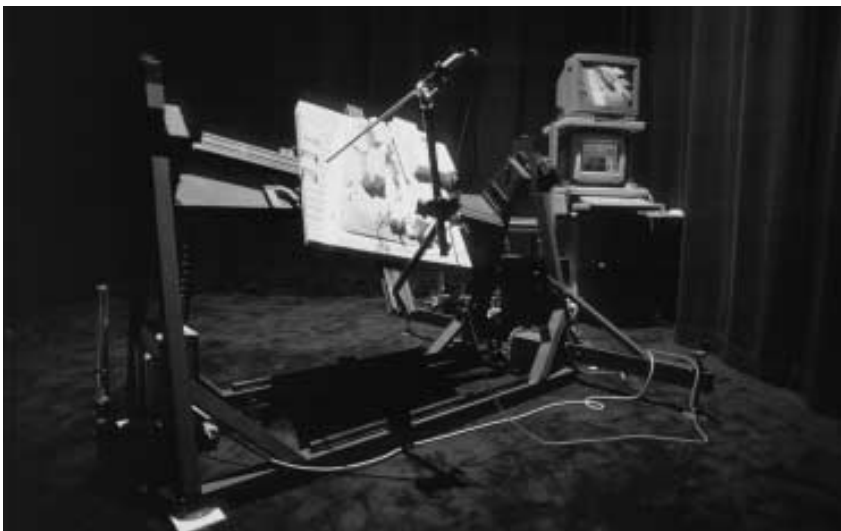


Figure 2.25: Simulateur de lumière directe (héliodon automatisé, EPFL).



Il offre ainsi la possibilité de prendre en compte l'aspect dynamique de la lumière naturelle provenant directement du soleil. Le couplage avec une caméra vidéo permet de réaliser des films montrant le déroulement d'une journée, ou le passage d'une saison à une autre pour une heure donnée. Cet outil permet de résoudre des problèmes concernant l'éclairage intérieur des locaux, ainsi que ceux nécessitant des calculs d'ombrages ou de reflets dus à l'environnement d'un bâtiment.

Programmes informatiques

La propagation de la lumière dans les locaux peut être reproduite au moyen d'outils informatiques, en liaison avec des techniques d'imagerie numérique. L'intérêt est de pouvoir mener des études paramétriques détaillées, avec une précision difficile à atteindre à l'aide de maquettes. Cela permet, par exemple, de tester rapidement l'influence de la géométrie d'un local, de faire varier la photométrie de ses parois ou l'inclinaison d'une protection solaire.



Figure 2.26: Visualisation infographique d'un local éclairé par la lumière naturelle (unité solaire du LESO-PB/EPFL, logiciel ADELIN / RADIANCE).

Les résultats obtenus sont produits sous forme d'images de synthèse, de profil de facteur de lumière du jour et d'indicateurs de confort visuel (voir figures 2.26, 2.27 et 2.28).

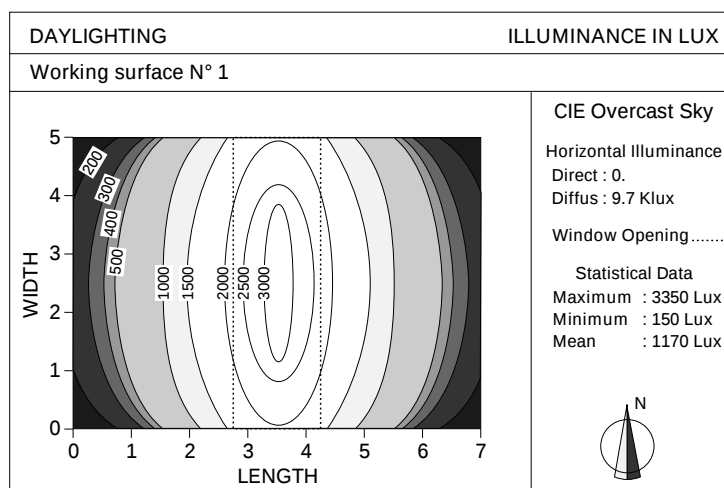


Figure 2.27: Tracé des courbes iso-éclairage (programme ADELIN/SUPER-LITE).

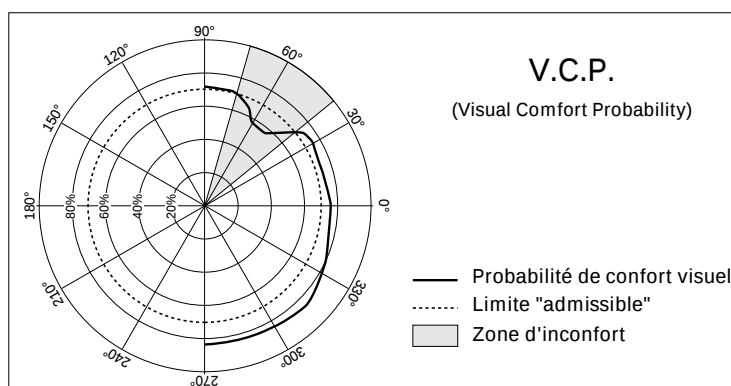


Figure 2.28: Probabilité de confort visuel en fonction de la direction du regard (algorithme de Guth, programme ADELINERADIANCE)

L'Association Suisse de l'Eclairage (SLG) a établi une liste des programmes disponibles aujourd'hui sur le marché. La table suivante donne un aperçu de ces derniers.

Programme	Applications	Distributeur
LUCY	Intérieur	Erco Neuco
LMT-PC	Intérieur	Fluora LMT
CALCULUX (LIDEC)	Intérieur	Philips
COPHOS	Intérieur	Zumtobel
LICHPLAN	Intérieur	Schultheis
LUXUS	Intérieur	Züllig+Rhyner
PIN	Intérieur	BAG, Staff, Hoffmeister
EXL	Terrains de sport	BAG
SILICHT	Intérieur	Siemens
SISTR	Voirie	Siemens
SIPLATZ	Places	Siemens
LICHT	Intérieur	Neuco, Trilux
XENON	Intérieur	Tulux
LICHT05-PC/E	Eclairage public	AEG
LICHT05-PC/L	Voiries	AEG
LICHT11-PC	Intérieur	AEG
RELUX	Intérieur	Regent
LUMENMICRO	Intérieur / extérieur + lumière naturelle	Belux (USA)
EASYLIGHTS	Intérieur, voirie, places	PRC Krochmann
EASYDAYS	Lumière naturelle	PRC Krochmann
SUPERLITE	Lumière naturelle	EMPA
ADELINER	Lumière naturelle Intérieur / extérieur	EPF Lausanne
SONNE	Lumière naturelle	Steinbeis

Figure 2.29: Liste des outils informatiques de simulation en éclairage, disponibles sur le marché d'après l'Association Suisse de l'Eclairage (SLG)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] «ADELINE» descriptif sommaire, International Energy Agency: SHC Task 12, CUEPE, Chemin de Conches 4, CH-1231 Genève-Conches, 1992.
- [2] «Éclairage naturel et artificiel de complément dans l'habitat et les locaux de travail», Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, Section Habitat, Ministère chargé de la Santé, 1990.



- [3] «La lumière à l'ordre du jour» Association pour le Développement de l'Hygiène et de l'Epidémiologie en Bretagne (ADHEB), F-35650, LE RHEU, Ministère chargé de la Santé, 1990.
- [4] «Intensive Tageslichtnutzung in Hochbauten; Phase 1 Systemvergleich», NEFF, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, 1984.
- [5] «Designing for Energy Efficiency: A Study of Eight California State Office Buildings», Department of Architecture, University of California, Berkeley, USA, 1981.
- [6] «Recommended Practice of Daylighting», IES RP-5, IESNA, New York NY, USA, 1979.
- [7] «Office Lighting» American National Standard, IESNA, New York NY, USA, 1982.
- [8] «Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht», SEV 8911.1989, Zurich, 1989.



2.5 EXEMPLE DE RÉALISATION

■ Système de lumière naturelle

Institut de Pathologie, Université de Berne



Figure 2.30: Vue générale du bâtiment

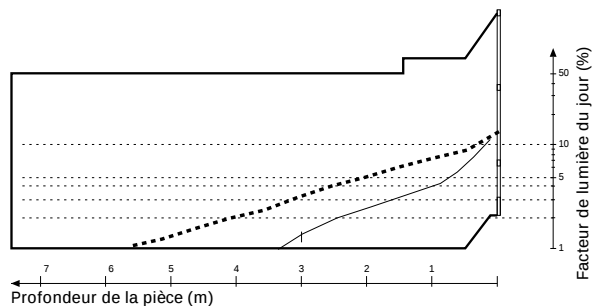
Données générales

Bâtiment:	Institut de Pathologie, Université de Berne
Architecte:	Itten & Brechbühl
Situation:	Site urbain
Orientation des locaux:	Nord-Est
Affectation:	Bureaux, laboratoires de recherche locaux d'enseignement
Surface de plancher:	20'100 m ²
Conception:	1986,
Construction:	1991

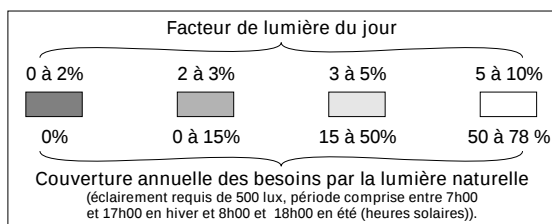
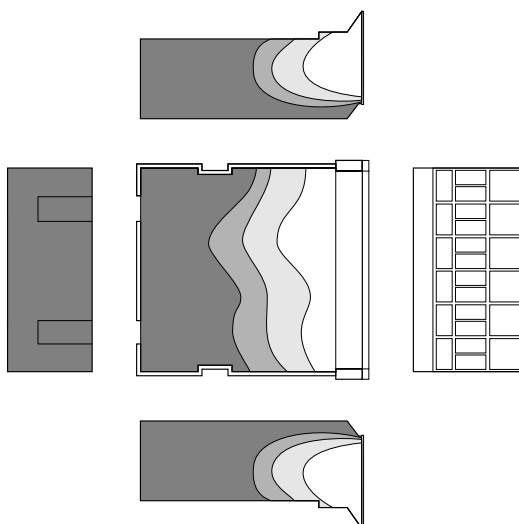


Institut de Pathologie, Université de Berne Local 174

Profil de facteur de lumière du jour
(Coupe longitudinale dans l'axe du local)



Courbes iso-facteur de lumière du jour
(représentation éclatée du local)



Caractéristiques du local

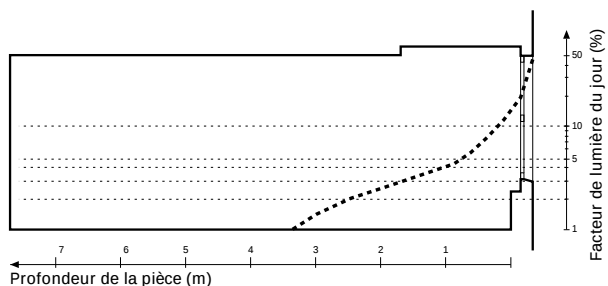
Surface :	52.65 m ²
Profondeur :	7.45 m
Hauteur courante :	2,64 m
Surface vitrée :	15.50 m ²
Indice d'ouverture corrigé:	29.5 %
Facteurs de réflexion du plafond (peinture blanche - métal perforé blanc) :	0.83 - 0.71
Facteurs de réflexion des murs (peinture blanche - béton brut) :	0.84 - 0.27
Facteurs de réflexion du sol (linoléum gris):	0.30
Vitrage :	double vitrage sélectif
Protection solaire :	Stores en toile



Institut de Pathologie, Université de Berne Local 576

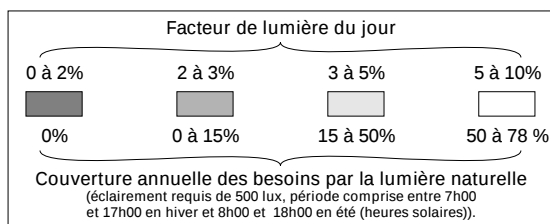
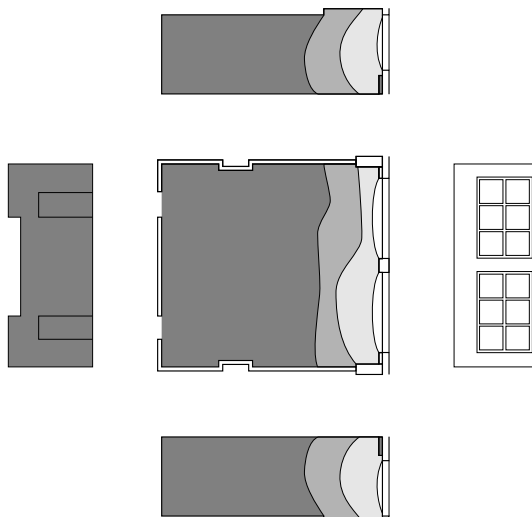
Profil de facteur de lumière du jour

(Coupe longitudinale dans l'axe du local)



Courbes iso-facteur de lumière du jour

(représentation éclatée du local)



Caractéristiques du local

Surface :	54.45 m ²
Profondeur :	7.70 m
Hauteur courante :	2,64 m
Surface vitrée :	6.60 m ²
Indice d'ouverture corrigé:	12.1 %
Facteurs de réflexion du plafond (peinture blanche - métal perforé blanc) :	0.81 - 0.71
Facteurs de réflexion des murs (peinture blanche - béton brut) :	0.84 - 0.27
Facteurs de réflexion du sol (linoléum gris):	0.30
Vitrage :	double vitrage sélectif
Protection solaire :	Stores à lamelles orientables



■ Caractéristiques particulières

L'une des particularités remarquables de ce bâtiment réside dans la configuration des linteaux. Dans une partie des locaux, ceux-ci sont en effet découpés en biais (1^{er} et 2^e niveaux), ce qui a pour effet d'augmenter la surface vitrée en partie haute (voir figure 2.31, local 174). La comparaison avec les locaux munis de linteaux classiques (voir figure 2.32, local 576), montre un gain appréciable au niveau du facteur de lumière du jour, notamment dans les parties éloignées des ouvertures. La couverture annuelle des besoins par la lumière naturelle seule se trouve donc largement renforcée.

BIBLIOGRAPHIE

Fiche RAVEL M4 (projet LUMEN); Etudes Typologiques, Modèles. ITB / CHARC EPFL, Lausanne 1993.



3. TECHNIQUES D'ÉCLAIRAGE ARTIFICIEL 59

■ 3.1 Le bureau et les zones	61
■ 3.2 Objectifs de l'éclairage artificiel	61
■ 3.3 Critères et paramètres d'un projet d'éclairage	63
■ 3.4 Modes d'éclairage artificiel	64
■ 3.5 Commande de l'éclairage	75
■ 3.6 Exemples de réalisation	78



3. TECHNIQUES D'ÉCLAIRAGE ARTIFICIEL

3.1 LE BUREAU ET LES ZONES

Le mot «bureau» est beaucoup plus ancien que l'invention de la lumière électrique, qui date d'une centaine d'années. On appelait «bureau» un meuble, une table ou un secrétaire.

Du fait de l'industrialisation et de la mécanisation, les activités d'un grand nombre de personnes du monde «civilisé» ont été transférées, d'abord des champs aux ateliers et aux usines, et ensuite des usines aux «bureaux». Aujourd'hui on appelle «bureau» une pièce où il y a des meubles, des tables, des places de travail.

Un bâtiment administratif ou une surface de bureau sont souvent divisés en différentes zones (secteurs), auxquelles sont associées des:

- bureaux cellulaires;
- bureaux cellulaires représentatifs (image de marque);
- bureaux paysagés (grande surface);
- locaux de séances ou/et de conférences (avec ou sans équipement audiovisuel);
- locaux de formation (pour personnel interne, externe ou temporaire);
- réception, téléphonistes;
- archives;
- circulations.

Une très grande flexibilité architecturale est souvent exigée pour ces surfaces, afin de pouvoir adapter les zones à l'évolution des services, des tâches, de la mobilité et de l'organisation optimale de l'entreprise. Une flexibilité de cloisonnement est primordiale, en particulier pour des surfaces prévues à la location.

Le présent chapitre tient compte principalement de l'éclairage des places de travail dans les trois premiers types de zones. Il tient compte également de l'outil de travail qui a connu une évolution fulgurante: le terminal à écran de visualisation.

Les tâches de bureau se déroulent principalement sur deux niveaux:

- sur une surface horizontale pour la lecture, l'écriture et le dessin;
- sur une surface verticale pour les travaux à l'écran, le dessin sur planche, ainsi que les armoires et étagères.

Les plans de travail horizontaux sont supposés être à la même hauteur (env. 0,75 m). Les locaux sont eux aussi de même hauteur (env. 3 m).

3.2 OBJECTIFS DE L'ÉCLAIRAGE ARTIFICIEL

L'éclairage artificiel doit principalement répondre aux objectifs suivants:

- permettre l'exécution d'une tâche avec un maximum de chances de succès (performance visuelle);



- assurer le bien-être des usagers (confort visuel);
- susciter une émotion particulière (agrément visuel).

L'éclairage est d'abord destiné au sens de la vue, donc à l'oeil; c'est l'organe d'information le plus important de l'homme. Cela est vrai pour autant que les conditions de l'environnement physiologique soient adaptées au processus de perception.

Les exigences envers les techniques d'éclairage artificiel sont élevées; elles doivent satisfaire une multitude de critères de qualité. Cela comprend des critères objectifs, calculables et quantifiables, ainsi que des valeurs non mesurables et irrationnelles, qui touchent à l'aspect subjectif du bien-être des personnes (confort, sentiments, émotions).

La lumière n'influence donc pas seulement la vue; elle contribue aussi à la stimulation et au confort de l'homme, et par là à sa performance et sa sécurité.

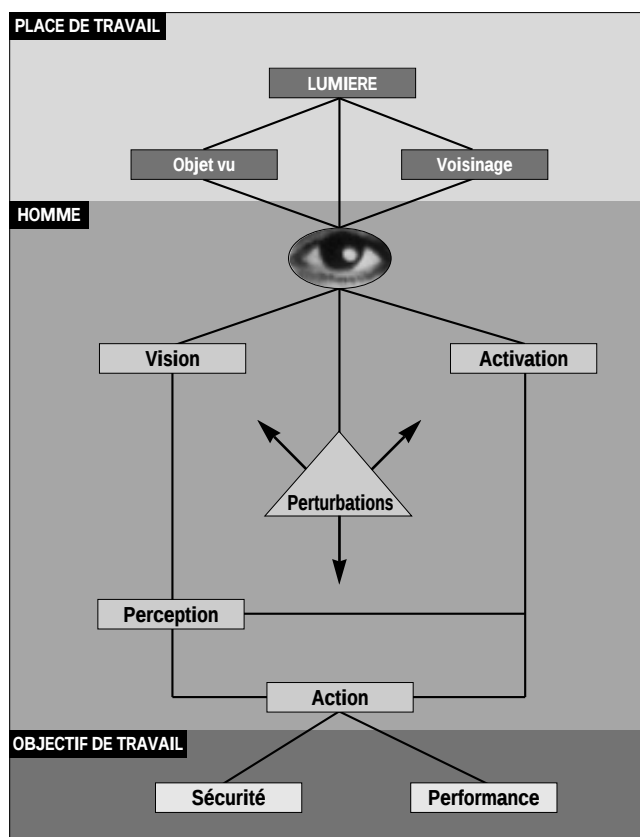


Fig. 3.1: Représentation schématique de l'influence de la lumière sur l'homme dans le cadre du travail.

La lumière atteint l'oeil de trois façons:

- directement depuis la source (fenêtre, luminaire);
- par réflexion sur un objet (feuille de papier);
- par réflexion de l'environnement (parois, plafond, mobilier).

La lumière réfléchie par l'objet est déterminante. De cette réflexion lumineuse dépend la perception de l'information et l'action (voir figure 3.1). La vitesse et la qualité de ce processus sont toutefois fonction de la stimulation (mobilité mentale), elle aussi commandée par la lumière.

La perception est principalement - contrairement à la fonction visuelle - un processus psychique. Tous les aspects de ce processus, qui détermine l'acceptance de l'éclairage et le bien-être de l'homme au travail, ne sont pas tous élucidés.



La règle générale ci-dessous peut toutefois être formulée.

Règle générale de l'éclairage artificiel

La vue de l'homme est adaptée à la lumière naturelle. Un «bon éclairage» doit chercher à recréer les mêmes conditions:

- Lumière émise à partir de sources de grande dimension (voûte céleste).
- Foyer lumineux au-dessus de l'horizon.
- Répartition équilibrée des luminances dans le champ visuel.
- Faibles contrastes de luminances.
- Composante verticale de l'éclairage intense.
- Ombres douces (sauf en cas de lumière solaire directe).
- Pas de brillances, ni de reflets gênants.

3.3 CRITERES ET PARAMETRES D'UN PROJET D'ÉCLAIRAGE

■ Contexte général

L'élaboration et la réalisation d'un projet d'éclairage ne sauraient être le fruit du hasard. Afin de permettre une planification efficace de son intervention, l'éclairagiste doit être intégré très tôt à l'équipe de projet pour:

- faire connaissance de l'objet architectural (structure, trame, volume, zones, orientations, protection solaire, matériaux, etc)
- connaître les besoins du maître de l'ouvrage (économie d'énergie par ex.)
- définir le degré de flexibilité d'aménagement (cloisonnement des surfaces, mobilité des places de travail)
- prévoir l'intégration des luminaires sur le plan architectural (en accord avec l'architecte).

Il fait appel à son expérience et appréciera son projet sur la base d'un certain nombre de critères de qualité.

■ Critères d'appréciation (critères de qualité)

Les paramètres décisifs, en terme de qualité, sont les suivants:

- éclairage horizontal et vertical appropriés (grandeur mesurable);
- protection contre les brillances et éblouissements indirects;
- limitation de l'éblouissement direct;
- répartition harmonieuse des luminances (sensation de luminosité);
- économies d'énergie;
- répartition des ombres;
- couleur de la lumière;
- rendu des couleurs.

Pour répondre au mieux à ces critères de qualité - subjectifs pour la plupart - dans un contexte défini, l'éclairagiste doit faire le choix d'un mode d'éclairage, à partir des paramètres techniques ci-dessous.



■ Paramètres techniques

Les paramètres de nature technique, à prendre en compte, sont les suivants:

- évaluation des apports de lumière du jour;
- type de sources;
- type de luminaires;
- disposition des luminaires (par rapport à la place de travail);
- commande de l'éclairage;
- consommation d'énergie;
- problèmes d'entretien;
- apports thermiques;
- coût financier (investissement et exploitation).

Les critères et les paramètres techniques ci-dessus sont développés dans les paragraphes suivants.

La consommation d'énergie, et donc aussi l'économie d'énergie, dépendent principalement du choix d'une commande d'éclairage appropriée, et aussi dans une moindre mesure des autres paramètres techniques mentionnés.

3.4 MODES D'ÉCLAIRAGE ARTIFICIEL

Les quatre principaux modes d'éclairage artificiel de bureaux sont les suivants:

- éclairage direct
- éclairage indirect
- éclairage direct/indirect
- éclairage à deux composantes.

■ Eclairage direct

Ce mode d'éclairage implique la projection de la lumière, directement de la source ou du luminaire, sur la surface de travail.

L'éclairage direct est le mode le plus répandu, depuis le développement des tubes fluorescents (1950). Trois techniques d'éclairage direct peuvent être distinguées; elles correspondent aux trois subdivisions de ce paragraphe.

La figure 3.2 illustre trois catégories de luminaires appropriés à l'éclairage direct; les courbes photométriques expriment l'intensité

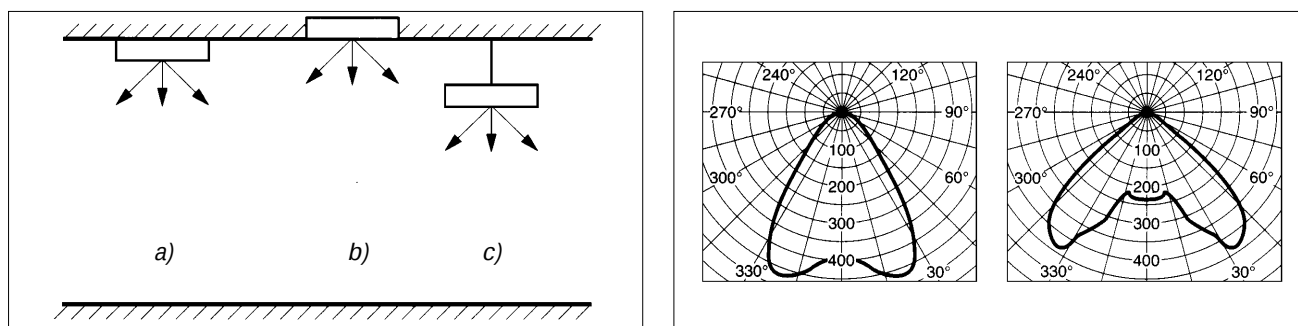


Fig. 3.2: Principe de l'éclairage direct à tubes fluorescents a) apparents, b) encastrés, c) suspendus



lumineuse (I) mesurée en candela, émise par ces derniers. L'intensité et la forme de la courbe (l'angle de défilement) sont déterminés par:

- le type de source (flux lumineux);
- la construction du luminaire et de son optique (réflecteur et grilles paralumes).

Les exemples ci-dessus montrent deux courbes directives (angle de défilement de 45°): celle de gauche est intensive, celle de droite est extensive (forme d'aile de chauve-souris ou «batwing», caractérisée par une faible intensité à 0°).

Pour les éclairages de type fluorescent, les ballasts à économie d'énergie ou à haute-fréquence, doivent être utilisés.

Règle importante en ce qui concerne les tubes fluorescents

Pour les sources de type fluorescent, utilisées généralement en éclairage direct, les appareils auxiliaires (ballasts) représentent une consommation non négligeable d'électricité par rapport à celle des sources elles-mêmes (jusqu'à 30% de la consommation pour les appareils de technologie ancienne).

Pour ce mode d'éclairage, les ballasts à faible consommation d'énergie suivants sont préconisés:

- Ballasts à faibles fuites (modèle VVG, consommation 5 à 7 W).
- Ballasts électroniques à haute fréquence (modèle EVG, consommation 3 à 5 W).

Dans les opérations de rénovation d'installations d'éclairage artificiel, le remplacement des anciens luminaires par des dispositifs modernes, pourvus de ballasts électroniques ou à faibles fuites, permet d'améliorer la qualité de l'éclairage, tout en économisant de l'énergie (jusqu'à 30% de la consommation de l'ancienne installation).

Luminaires à diffuseur ou à lamelles

Ce type de luminaires produit un bon éclairage général pour les places de travail qui ne sont pas munies d'écrans de visualisation; ils sont à bannir dans l'autre cas (reflets gênants). La figure 3.3 illustre ce type de luminaires.

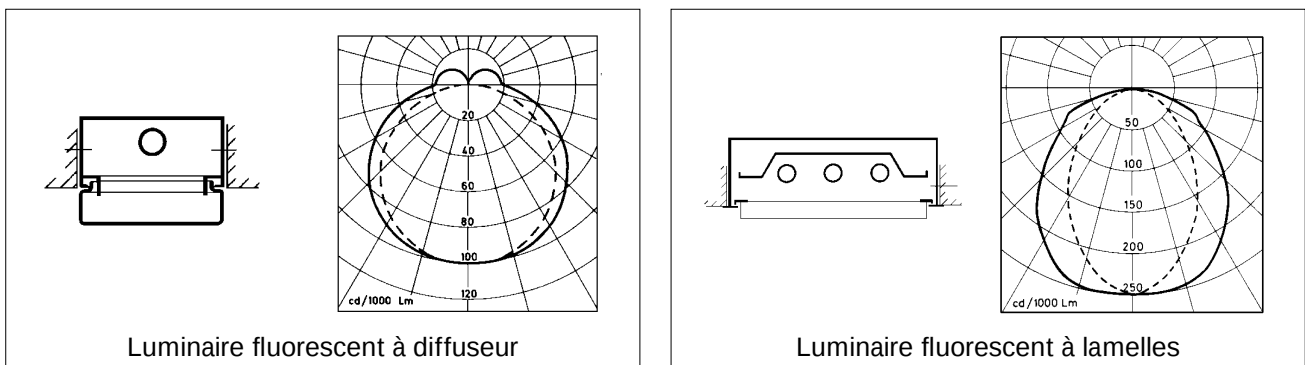


Fig. 3.3: Luminaires appropriés à des places de travail sans écran de visualisation



Caractéristiques de l'éclairage direct par des luminaires à diffuseur ou à lamelles

- L'éblouissement direct est généralement atténué par la grande surface de diffusion.
- Aucune protection n'est assurée contre l'éblouissement indirect, provoqué par les reflets sur des surfaces brillantes (papier, mobilier).
- La disposition des luminaires pour les grands bureaux doit être parallèle aux fenêtres. Leur commande doit être effectuée en rangées séparées, si possible par sonde d'éclairage. Leur disposition peut être interrompue selon la trame architecturale, pour permettre un cloisonnement plus flexible.
- La répartition des luminances est bonne; elle est semblable à celle de la voûte céleste.

Les figures 3.4 et 3.5 illustrent deux cas d'éclairage direct dans un bureau cellulaire et un bureau paysagé. Une photographie, illustrant un tel mode d'éclairage, est donnée à la figure 3.6.

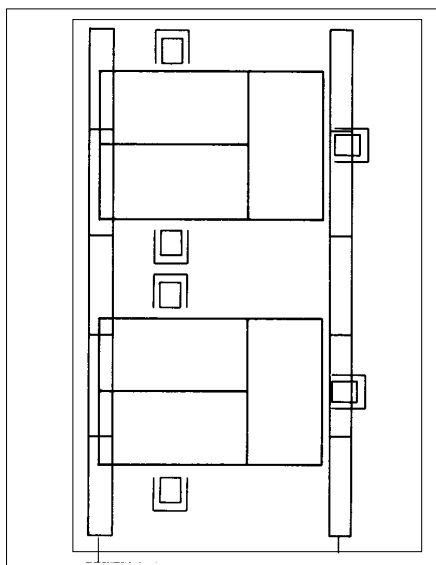


Fig. 3.4: Disposition des luminaires dans un bureau cellulaire «conventionnel». Grande liberté d'aménagement des places de travail.

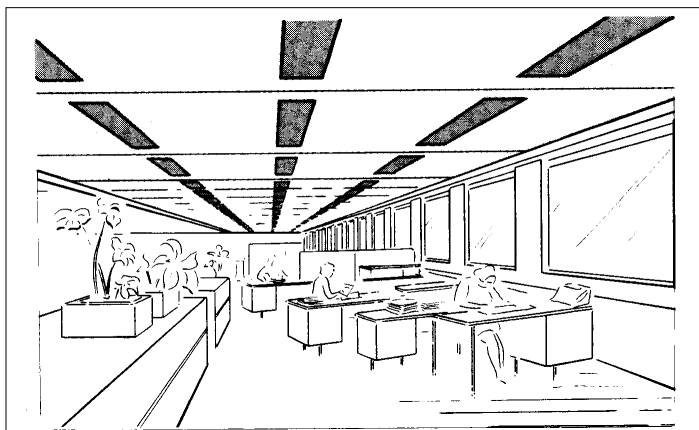


Fig. 3.5: Disposition des luminaires dans un bureau paysagé. Cloisonnement possible, liberté d'aménagement des places de travail.



Fig. 3.6: Eclairage direct d'un bureau (luminaires à lamelles)

■ Eclairage direct par plafond lumineux

Plus grande est la surface émettant la lumière (plafond lumineux), plus faible est le risque d'éblouissement pour un même éclairement sur le plan de travail (diminution des luminances). La figure suivante illustre ce mode d'éclairage.

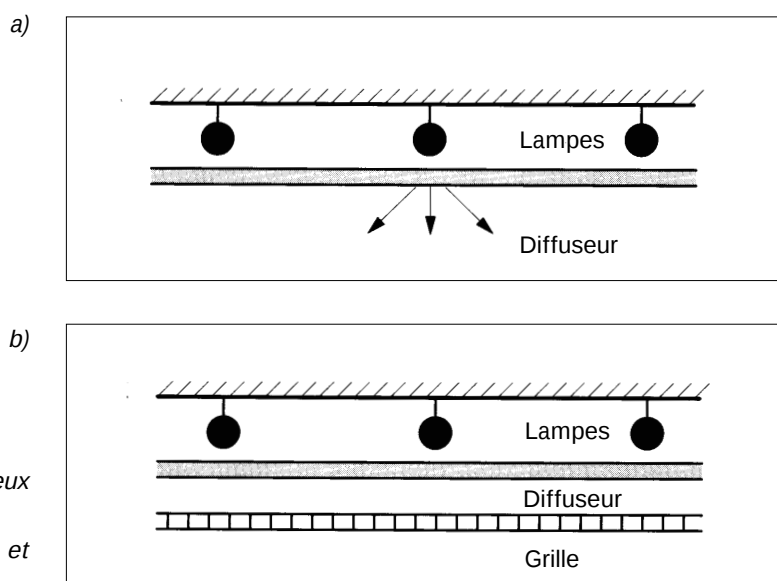


Fig. 3.7: Eclairage par plafond lumineux

a) Plafond lumineux avec diffuseur

b) Plafond lumineux avec diffuseur et grille paralume

Ce mode d'éclairage est approprié à des bureaux de grande surface, pour autant que les places de travail soient à plus de 6 m. des fenêtres. Toutefois, le rendement de ce mode d'éclairage est faible; il est donc peu utilisé de nos jours.



Caractéristiques de l'éclairage direct par plafond lumineux

- Ce mode d'éclairage est peu recommandable du fait de son faible rendement lumineux. Il n'est généralement pas compatible avec des objectifs d'économie d'électricité.
- Il présente, par ailleurs, des problèmes de maintenance, liés aux difficultés de nettoyage et d'entretien des éléments diffuseurs.

Eclairage direct pour places de travail à écran de visualisation

L'introduction de l'informatique et l'utilisation d'écrans et de claviers comme outils de travail, temporaires ou permanents, n'ont pas modifiés pour autant les objectifs et les critères d'appréciation d'une installation d'éclairage artificiel (voir paragraphes 3.2 et 3.3).

Le respect des critères de protection contre l'éblouissement et ceux d'une répartition adéquate des luminances gagne toutefois beaucoup en importance.

L'écran, de par son effet miroir et sa luminance propre, nécessite d'adapter la stratégie d'éclairage à ce dernier en intervenant, soit sur les luminaires, soit sur le mode d'éclairage.

Les caractéristiques des luminaires, appropriés à l'éclairage direct des places de travail à l'écran, doivent ainsi répondre à des considérations liées à la géométrie de la place de travail.

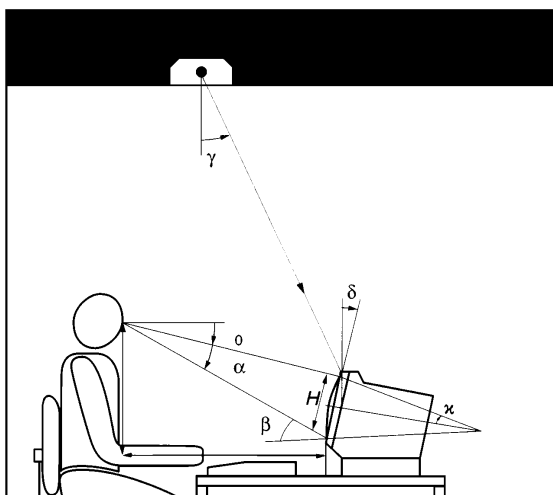


Fig. 3.8: Géométrie d'une place de travail à l'écran. Base pour la définition de la photométrie d'un luminaire (angle de défilement de la lumière).

Les luminaires, supposés répondre à ces exigences, sont équipés d'une optique miroitée (réflecteur, grille), destinée à réduire les luminances de la surface émettant la lumière. Celle-ci est par ailleurs fortement dirigée afin d'éviter les éblouissements directs et indirects.

Les courbes photométriques de ces luminaires sont données à la figure 3.2.

Cette technique de conduite de la lumière artificielle s'est concentrée sur l'élimination - ou la réduction - des brillances et reflets sur l'écran. Ce but a généralement été atteint, parfois, au détriment des usagers.

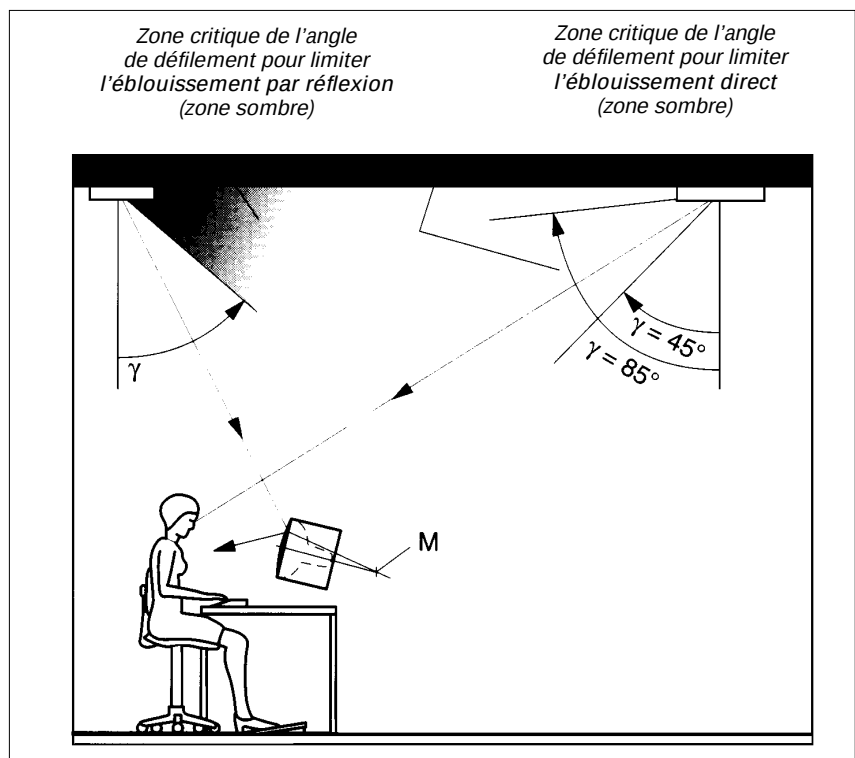


Fig 3.9: Angles critiques de défilement permettant de limiter les risques d'éblouissement

On peut en effet recenser un certain nombre d'avantages et d'inconvénients résumés dans l'encadré suivant.

Caractéristiques de l'éclairage direct pour places de travail à l'écran

- Ce mode d'éclairage est compatible avec une diminution générale du niveau d'éclairement, donc à une diminution de la consommation d'énergie.
- Avec ce type d'éclairage, une puissance moyenne de 7W/m² (local éclairé par la lumière du jour) peut être atteinte. Une commande asservie à la lumière naturelle permet d'atteindre une puissance moyenne de 3W/m² (valeur cible), dans le meilleur des cas.
- Il se caractérise par un éclairement vertical réduit; par opposition, l'éclairement horizontal est considérablement renforcé. Il peut en résulter des réflexions et des reflets gênants sur la place de travail (meubles, clavier, papier).
- La zone au-dessus de l'angle de défilement - entre 45° et 85° - est peu éclairée: le plafond et le haut des parois apparaissent donc sombres ($L < 200 \text{ cd/m}^2$). On désigne de ce fait ce mode d'éclairage par «darklight» (lumière sombre).
- Les luminaires appropriés à ce mode d'éclairage sont caractérisés généralement par une faible luminance, du fait de leur optique miroitée. Le risque de reflets sur l'écran s'en trouve réduit.
- La répartition des luminances est très irrégulière et de ce fait contraire à celle de la lumière naturelle (qu'on devrait par analogie appeler «clearlight»). Ce mode d'éclairage est donc parfois mal jugé par les utilisateurs.



Malgré ces inconvénients, ce mode d'éclairage est toujours très répandu. Une commande avec régulation automatique ou manuelle peut améliorer le système, sans rendre toutefois ce dernier totalement conforme aux critères d'appréciation d'un bon éclairage.

La disposition des luminaires se fait en principe de façon symétrique et parallèle aux fenêtres, afin d'obtenir un éclairage général uniforme (cf. figure 3.10).

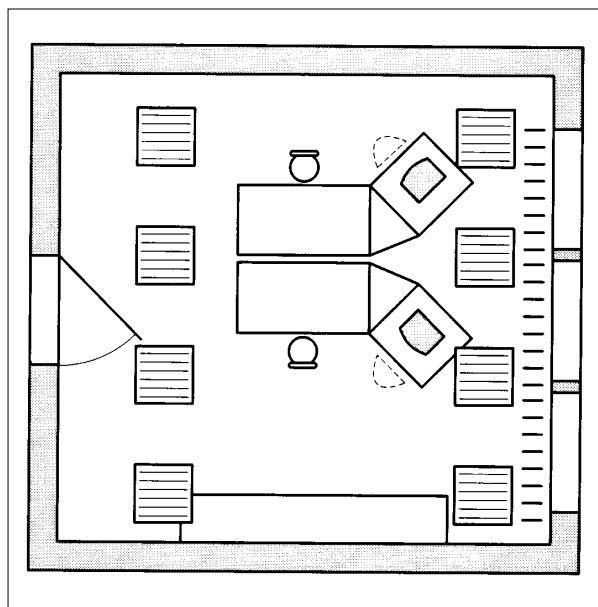


Fig. 3.10: Disposition uniforme de luminaires carrés dans un bureau cellulaire. Rideaux contre l'éblouissement direct de la lumière du jour, suspendus aux fenêtres.

L'aménagement des places de travail reste libre. Il s'orientera toutefois toujours d'après les sources de lumière, afin d'éviter au mieux des reflets gênants et des éblouissements directs. Ce mode d'éclairage s'applique aussi à des bureaux de grande surface.



Fig. 3.11: Exemple d'un éclairage direct du type «Darklight» (bureau à écrans de visualisation).



Eclairage indirect

L'éclairage indirect consiste à utiliser une surface, généralement le plafond, comme réflecteur pour diffuser la lumière. Les luminaires sont soit suspendus au plafond, montés sur pied, sur cloisons ou en appliques (voir figure 3.12).

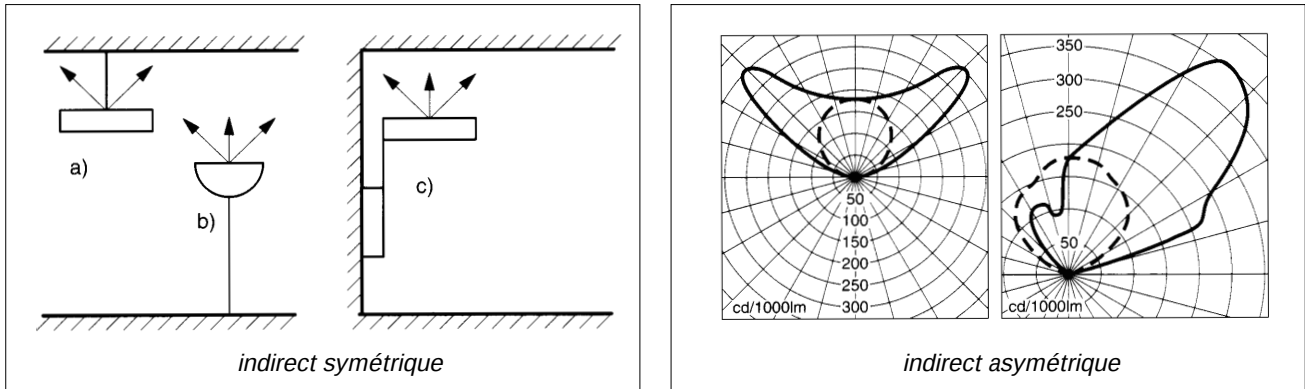


Figure 3.12: Principe d'un éclairage indirect par: a) luminaires suspendus, b) lampadaires mobiles ou montés sur cloison, c) appliques.

Les sources de lumière sont des lampes fluorescentes ou des lampes à décharge (lampes à hallogénures métalliques). A niveau d'éclairage égal, leur consommation d'énergie est identique. Elle est nettement inférieure à celle des lampes hallogènes qui ne sont pas recommandables du fait de leur faible efficacité lumineuse.

Les lampes à décharge sont très compactes, ce qui permet de les intégrer à des luminaires de design particulier. Elles ne sont par contre pas réglables, contrairement aux tubes fluorescents alimentés en haute fréquence (ballasts électroniques HF). Des puissances installées de l'ordre de 12 W/m² peuvent être obtenues, même avec un éclairage indirect, si l'on utilise des sources et des appareils auxiliaires efficaces.

Ce mode d'éclairage peut être considéré comme un éclairage à la tâche; la lumière résiduelle suffit généralement pour la circulation.

Le bilan énergétique de ce dernier (lampadaires munis de tubes fluorescents) peut être considérablement amélioré par:

- une régulation automatique par sonde ou par variateur;
- un réglage mécanique de l'optique, permettant de modifier la forme de la surface diffusant la lumière (plafond), ainsi que sa luminance.

L'encadré suivant résume les principales caractéristiques, de ce mode d'éclairage

Caractéristiques de l'éclairage indirect

Avantages

- Bonne protection contre les éblouissements, du fait de la diffusion de la lumière par le plafond (pas d'éblouissement direct).
- Répartition adéquate des luminances (caractéristiques semblables à la lumière du jour).



- Eclairage horizontal et vertical satisfaisants.
- Economies d'énergie possible grâce à l'individualisation des commandes à la place de travail (la lumière est au bon endroit et fonction des besoins). Les usagers doivent toutefois être motivés; dans le meilleur des cas, cette économie peut atteindre 50 % dans un bureau de grande surface (4 places de travail ou plus), par rapport à un éclairage direct avec commande manuelle.
- Liberté totale pour l'aménagement des surfaces et de l'ameublement (lampadaire mobile). La lumière «résiduelle» suffit généralement pour les besoins de circulations.
- Pas d'installation au plafond, maintenance facilitée.

Inconvénients

- Ce mode d'éclairage peut conduire à une consommation d'énergie excessive si les sources utilisées ne sont pas d'efficacité élevée (lampes hallogènes). Il en est de même, si les utilisateurs ne sont pas suffisamment motivés et informés pour l'utiliser à bon escient (éclairage en fonction des besoins).
- Les luminaires pourvus de lampe à décharge (hallogénures métalliques) ont besoin d'une période de chauffage (2 mn). Un effet de papillotement est parfois perceptible.
- Absence d'ombres (perception d'objets tridimensionnels difficile).
- Trop forte luminance du plafond pour certaines sources.



Figure 3.13: Exemple d'un éclairage indirect (luminaires à tubes fluorescents)



Eclairage direct/indirect

Ce mode d'éclairage est similaire au mode indirect, décrit au paragraphe précédent, mais se distingue par le fait qu'une partie de la lumière est aussi projetée directement sur le plan de travail (mode direct). La partie indirecte reste toutefois dominante.

Il existe des luminaires dont une même source produit l'éclairage indirect et direct. D'autres ont deux sources distinctes avec commandes séparées.

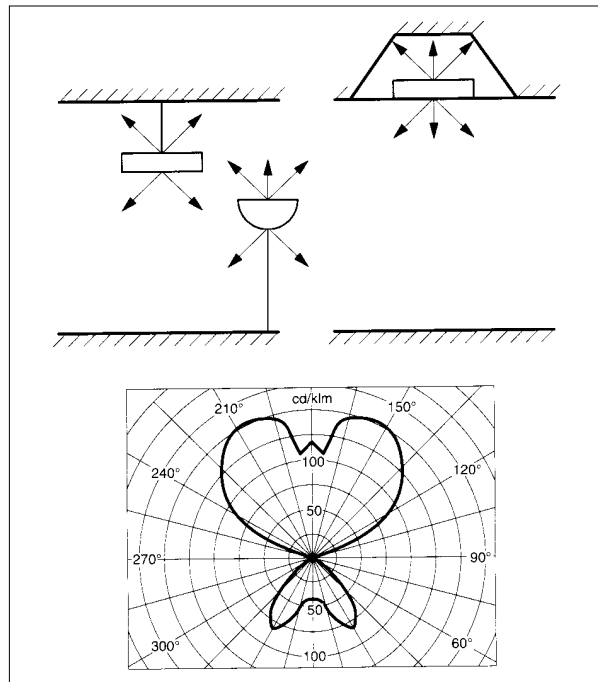


Fig. 3.14: Combinaison d'un éclairage direct et indirect (luminaires suspendus, mobiles ou à caissette).



Fig. 3.15: Exemple d'un éclairage direct/indirect (lampes fluorescentes). Voir aussi figure 0.1 (chapitre d'introduction).



Les avantages de ce mode d'éclairage sont identiques à ceux de l'éclairage indirect. En plus, la partie directe crée des ombres avantageuses et permet de réduire la luminance au plafond.

Ce type d'éclairage est plus économique s'il est utilisé comme éclairage à la tâche, donc avec des luminaires mobiles. La partie indirecte est généralement suffisante comme éclairage général; la partie directe est utilisée pour éclairer le plan de travail (éclairage à la tâche). L'emplacement de cet éclairage doit toutefois être déterminé de façon très précise, afin de répondre aux critères de qualité de l'éclairage de la place de travail.

L'utilisation de tubes fluorescents est indispensable, si l'on veut obtenir une puissance installée raisonnable (de l'ordre de 10 W/m²) et une consommation d'énergie modérée.

■ Eclairage à deux composantes

Le principe de cet éclairage est le suivant:

- une première composante assure un éclairage général direct ou indirect de faible éclairement (env. 300 lux sur le plan de travail);
- une deuxième composante assure l'appoint directement sur la place de travail (éclairage à la tâche).

La composante de l'éclairage général, même pour un plus faible éclairement, doit posséder les mêmes caractéristiques que l'éclairage direct décrit plus haut. Combiné avec un éclairage à la tâche, les contrastes entre la surface de travail horizontale et les parois/plafond ne doivent pas être excessifs, afin de ne pas fatiguer visuellement les utilisateurs.

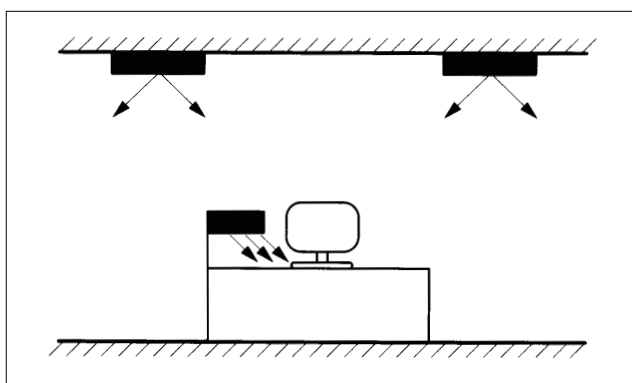


Fig. 3.16: Eclairage à deux composante (éclairage général direct et éclairage à la tâche). L'acceptance de ce mode d'éclairage est généralement faible.

Un éclairage général indirect, complété par un éclairage à la tâche, est semblable au mode décrit précédemment. Il est toutefois mieux accepté par les utilisateurs.

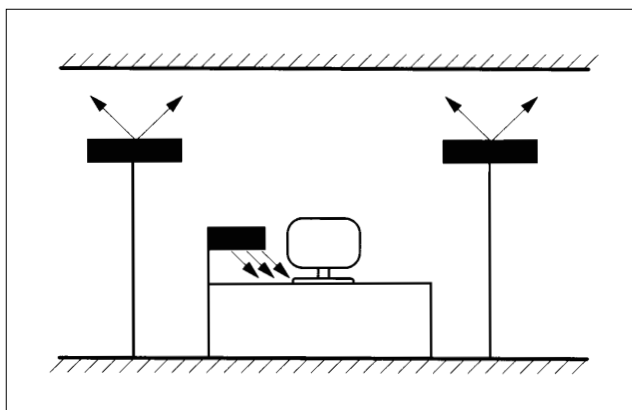


Fig. 3.17: Eclairage à deux composantes (éclairage général indirect et éclairage à la tâche). L'acceptance de ce mode d'éclairage est généralement bonne.



Le choix de l'éclairage à la tâche est toutefois délicat. Les éblouissements direct et indirect peuvent gêner l'utilisateur, ainsi que son voisin.

Des luminaires sur bras orientables à faible luminance - éventuellement réglables - sont appropriés. Les lampes hallogènes sont à éviter, du fait de leur consommation d'énergie et de leur luminance élevées.

Chaque composante se commande séparément; l'éclairage à la tâche doit être réglé par l'utilisateur de la place de travail.

Caractéristiques de l'éclairage à deux composantes

- Le faible niveau d'éclairement général (250 lux) permet d'obtenir de substantielles économies d'énergie.
- L'utilisation de sources efficaces (tubes fluorescents, lampes à décharge) est toutefois nécessaire (pas de lampes hallogènes).
- L'enclenchement des sources d'éclairage à la tâche, en fonction des besoins, garantit des économies supplémentaires. Cela nécessite toutefois d'informer les utilisateurs et d'équiper ces sources d'un régulateur.
- L'éclairage à la tâche est souvent en mode direct et peut donc générer des contrastes marqués et des réflexions gênantes

3.5 COMMANDE DE L'ÉCLAIRAGE

L'évaluation économique d'une installation tient compte de trois facteurs principaux:

- la qualité de l'éclairage (acceptance des utilisateurs);
- l'investissement financier (conception, réalisation);
- les coûts d'exploitation (entretien, consommation d'énergie).

La commande de l'éclairage influence ces trois facteurs.

La consommation, et donc l'économie d'énergie, sont ainsi fortement dépendantes du choix d'une commande appropriée. Peuvent être considérées comme commandes appropriées:

- la prise de conscience et la responsabilisation des utilisateurs (enclenchement des luminaires en fonction des besoins);
- l'utilisation optimale de la lumière naturelle (l'éclairage naturel doit faire partie du projet d'éclairage);
- la mise à disposition d'un éclairage au bon endroit et au bon moment (éclairage à la tâche).

Il est intéressant de constater que les romains appliquaient déjà ces techniques, quelques siècles avant notre ère (voir figure 3.18).



L'encadré suivant résume les différentes possibilités de commande de l'éclairage artificiel, permettant de réduire la consommation d'énergie.

Commande d'éclairage et économies d'énergie

Différentes techniques de commandes d'éclairage sont envisageables:

- Enclencher et déclencher individuellement l'éclairage selon les besoins, par place de travail, bureau ou zone (éclairage à la tâche);
- Enclencher l'éclairage de la même manière, mais le déclencher de façon centralisée par zone à un instant donné (p. ex. à la pause de midi) ou en fonction de la lumière du jour (p. ex. en cascades de 25 %);
- Enclencher l'éclairage de la même manière, mais régler automatiquement et de façon continue ce dernier par la lumière du jour (de 0 à 100 %).
- Enclencher et déclencher à l'aide d'un détecteur de présence et d'une sonde photométrique.



Figure 3.18: Fenêtre circulaire éclairant le labrum (bassin aux ablutions) dans le Caldarium (Thermes de Pompéi, architecte Vitruve): Un puits de lumière du jour rectangulaire permet d'éclairer le reste de la pièce.



Précautions

- Le niveau maximal d'éclairement doit être ajustable, pour tenir compte du vieillissement de l'installation et des besoins individuels (un utilisateur de 20 ans n'a pas les mêmes besoins qu'un utilisateur de 60 ans). La valeur maximale doit être vérifiée et ajustée annuellement.
- La possibilité de commuter la régulation, du mode automatique en mode manuel, doit être offerte; elle contribue à augmenter l'acceptance de l'installation et permet l'adaptation individuelle de l'éclairement aux différentes tâches.

Une commande, assurant une régulation telle que décrite ci-dessus, requiert un investissement relativement important. Toutefois suivant le mode d'éclairage considéré, cet investissement peut être amorti en quelques années. C'est le cas d'un éclairage direct, régulé par la lumière naturelle.

Aujourd'hui, les lampadaires mobiles, associés aux modes d'éclairage et direct/indirect, peuvent être équipés de variateurs automatiques ou manuels et de détecteurs de présence. Une réduction substantielle des kWh consommés peut ainsi être réalisée.

Bilan final

La sollicitation visuelle et mentale des employés de bureaux est en constante augmentation. De ce fait, les exigences d'environnement d'une place de travail, dont l'éclairage est un facteur important, évoluent constamment. Des mesures d'économies d'énergie sont, par ailleurs, nécessaires dans le domaine de l'éclairage. Les exigences d'un projet d'éclairage sont donc souvent contradictoires.

Une planification sur la base du seul calcul de l'éclairement moyen à l'aide d'une méthode traditionnelle (calculs des rendements), n'est aujourd'hui plus suffisante. Le processus de perception qui finalement détermine le bien-être, l'acceptance de l'éclairage et la performance de l'homme au travail, est très complexe. La tâche principale du planificateur est d'influencer ces rapports positivement. Il ne peut le faire que s'il a suffisamment d'expérience, une bonne dose de doigté, et s'il s'identifie continuellement aux problèmes posés (économies d'énergie p. ex.).

Une pré-évaluation à l'aide d'une échelle de valeurs, associée aux différents critères d'appréciation d'un éclairage, permet de comparer diverses solutions et de faciliter le choix définitif d'une installation.

Une post-évaluation avec la collaboration des utilisateurs permet la vérification in situ de l'adéquation du choix effectué.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SLG, «Manuel pour l'éclairage», 5^e édition, Ecomed, Berne (1992).
- [2] C.-H. Herbst, «Planification d'éclairage entre ergonomie et économie», Documents de la Journée SLG Berne (1992).



- [3] U. Lips, J. Weickhardt, H. Buchberger, Krueger «Le travail à l'écran de visualisation», CNA, 5^e édition (1991)
- [4] C.-H. Herbst, «Lumière au travail» Documents de la Journée. AFL, Berne (1990)
- [5] IESNA, «Lighting Handbook, Reference and Application Volumes», New York (1987).

3.6 EXEMPLES DE RÉALISATION

RENOVATION D'UNE INSTALLATION D'ECLAIRAGE ARTIFICIEL

BATIMENT UAP – LAUSANNE



Figure 3.19: Vue du bâtiment de l'UAP à Lausanne

■ Données générales

Maître d'ouvrage:	Union des Assurances de Paris (UAP)
Maître d'oeuvre (rénovation):	Bonnard et Gardel Ing.-Conseils, Lausanne
Situation:	Avenue de Cour 26, 1006 Lausanne
Affectation:	Bureaux
Construction:	4 niveaux sur rez
Surface de plancher:	2000 m ² (dont 400 m ² de zones de circulation)
Année de construction:	1969
Année de rénovation:	1991



Nature de la rénovation

Les travaux de rénovation entrepris sont de caractère lourd. Des transformations importantes ont été menées à bien, non seulement au niveau de l'éclairage artificiel, mais aussi en ce qui concerne les faux-plafonds, la distribution des locaux et les zones de circulation.

L'installation d'éclairage électrique a été entièrement renouvelée, après réfection préalable du faux-plafond. Les nouveaux luminaires ont été encastrés dans ce dernier; leur câblage, ainsi que le tableau électrique d'alimentation, ont été refaits à neuf.

Un local de bureau standard comprend 6 luminaires après rénovation (au lieu de dix initialement). Quatre d'entre-eux sont pilotés par une sonde d'éclairement, alors que le solde situé dans la partie arrière du local, est commandé manuellement.

Comparaison des installations



Figure 3.20: Vue de l'ancienne installation d'éclairage

Ancienne installation

Luminaire:	monotube 1 x 40 W/l, recouvert d'un verre acrylique soufflé opale
Source:	tube fluorescent Philips 34, 1 x 40 W, D 38 mm
Appareil auxiliaire:	ballast magnétique (consommation: 13 W)
Flux lumineux:	2060 Lm
Consommation totale par luminaire:	53 W



Figure 3.19: Vue de l'ancienne installation d'éclairage

Nouvelle installation

Luminaire:	monotube 1 x 50 W/l, muni d'optiques miroitées à haut rendement
Source:	tube fluorescent Philips 83 et 84, 1 x 50 W, D 26 mm
Appareil auxiliaire:	ballast électronique HF 28 kHz (consommation: 5 W)
Flux lumineux:	5200 Lm
Consommation totale par luminaire:	55 W

■ Prestations en éclairage

L'éclairage sur le plan de travail a été mesuré, avant et après rénovation. Les valeurs indiquent qu'une augmentation substantielle du niveau moyen a été obtenue:

Ancienne installation: $E_m = 240 \text{ Lux}$

Nouvelle installation: $E_m = 620 \text{ Lux}$

Outre le niveau moyen d'éclairage, la situation a été considérablement améliorée sur le plan de l'ergonomie visuelle:

- élimination de l'éblouissement direct par les luminaires;
- homogénéisation de l'éclairage;
- élimination du papillotement.



Economies d'énergie

Malgré l'augmentation substantielle du niveau d'éclairement, d'importantes économies d'énergie ont été observées durant la période de mesure. Sur une année d'utilisation, une diminution de la consommation d'énergie de 47 % a ainsi été obtenue. Cette dernière est imputable à l'abaissement de la puissance installée et à la commande par l'éclairage naturel. Si l'on ramène l'éclairement sur la surface de travail à la valeur des recommandations pour les bureaux (300 Lux), l'économie d'énergie correspondante est de 73%.

La table suivante illustre, à titre de comparaison, les caractéristiques de consommation d'un étage du bâtiment, avant et après rénovation.

Grandeurs caractéristiques	Ancienne installation	Nouvelle installation
Nombre de luminaires	122	85
Puissance installée		
• bureaux	16W/m²	12W/m²
• corridor	15W/m²	8W/m²
Consommation annuelle		
• bureaux	–	6550 kWh
• corridor	–	1920 kWh
• étage	15880 kWh	8470 kWh

Analyse des coûts

Une analyse détaillée des coûts est difficile, du fait de l'ampleur des rénovations entreprises (cloisons, faux-plafond, équipement électrique). Cette analyse n'est, par ailleurs, pas justifiable dans la mesure où les prestations en éclairage ont été considérablement augmentées dans le cas de la nouvelle installation (triplement du niveau d'éclairement).

Malgré cela, une diminution substantielle du coût d'exploitation de l'installation a été obtenue. L'évaluation de ce coût s'établit comme suit:

Dépenses annuelles	Ancienne installation	Nouvelle installation
Energie électrique	3080.–	1650.–
Remplacement des tubes	590.–	210.–
Maintenance	500.–	180.–
Coûts d'exploitation	4170.–	2040.–

Pour l'ensemble du bâtiment, la réduction des frais d'exploitation de l'installation d'éclairage est de 8500.– fr par an. Les deux tiers du montant sont imputables à la diminution de la consommation d'électricité (coût du kWh électrique de jour: 19.5 ct).



BIBLIOGRAPHIE

F. Benoit, J.-J. Meyer, D. Mondada, «Un meilleur éclairage avec moins d'énergie - Bilan des améliorations Union UAP-Assurances», Projet d'étude RAVEL 22.51, Bonnard et Gardel, Université de Genève, Lausanne/Genève (1992).

RENOVATION D'UNE INSTALLATION D'ECLAIRAGE ARTIFICIEL

BATIMENT OCFIM – BERNE



Figure 3.21: Vue du bâtiment de l'OCFIM à Berne

Données générales

Maître d'ouvrage: Bureau des Constructions Fédérales

Maître d'oeuvre (rénovation): Piazza Ing.-conseils, Bienne

Situation: Fellerstrasse 21, 3027 Bern-Bümpliz

Affectation: Office Central Fédéral des Imprimés et du Matériel (OCFIM)

Construction: 2 niveaux en sous-sol, 5 niveaux sur rez

Surface de plancher: 34'000 m² (dont 29'000 m² d'entrepôts)

Année de construction: 1964

Année de rénovation: 1990



■ Nature de la rénovation

La rénovation a consisté à remplacer les luminaires et les appareils auxiliaires par des composants plus performants. Des modifications ont été apportées au schéma de câblage électrique, de façon à subdiviser l'ensemble de l'installation en deux zones: l'une au voisinage des fenêtres et l'autre au centre des locaux. De nouveaux commutateurs ont été placés à proximité des portes d'accès.

Une démarche originale a été employée auprès des utilisateurs, avant de procéder à la rénovation. Trois variantes d'éclairage différentes ont été proposées (éclairage direct, indirect et combiné) et mises en place dans des locaux témoins. Ces variantes ont pu être évaluées par les utilisateurs; la solution finale adoptée est un éclairage direct à basse luminance.

■ Comparaison des installations

La rénovation apportée à l'éclairage des locaux de bureaux est la suivante:



Figure 3.22: Vue de l'ancienne installation d'éclairage des bureaux

Ancienne installation

Luminaire:	bitube Novelectric 2 x 40W/l
Sources:	tubes fluorescents OSRAM 2 x 36W D 26 mm
Appareil auxiliaire:	Ballast magnétique, KVG Leuenberger, 1967
Consommation totale par luminaire:	109W ($\cos \phi = 0.531$)



Figure 3.23: Vue de la nouvelle installation d'éclairage des bureaux

Nouvelle installation

Luminaire:	monotube Zumtöbel RAD-A 1 x 36W/l
Source:	tube fluorescent OSRAM 1 x 36W D26 mm
Appareil auxiliaire:	Ballast faibles fuites type VVG EC40, 1990
Consommation totale par luminaire:	43W ($\cos \phi = 0.482$)

La table suivante résume l'ensemble de la rénovation entreprise dans le bâtiment.

Locaux	Nombre de luminaires	
	Ancienne installation	Nouvelle installation
Entrepôts	2825 (1x36KVG)	1934 (1x58EVG)
Bureaux	1430 (2x36KVG)	1090 (1x36VVG)
Corridors	50 (2x36KVG)	50 (2x18VVG)
Cage d'escalier	32 (2x36KVG)	32 (1x36VVG)
Nombre total de luminaires	4337 (5849 sources)	3259 (3259 sources)

■ Prestations en éclairage

Les éclairagements sur le plan de travail, évalués pour la nouvelle installation, sont les suivants:

Bureaux:	Em = 480 ... 600 Lux
Entrepôts:	Em = 290 ... 370 Lux



Des questionnaires, soumis aux usagers après la rénovation, ont permis de mettre en évidence l'appréciation générale de la nouvelle installation par ceux-ci. Des critères subjectifs, portant sur le confort visuel, la perception des couleurs et l'ambiance lumineuse, ont été généralement gratifiés de la note "bon" et "optimal" par ces derniers.

■ Economies d'énergie

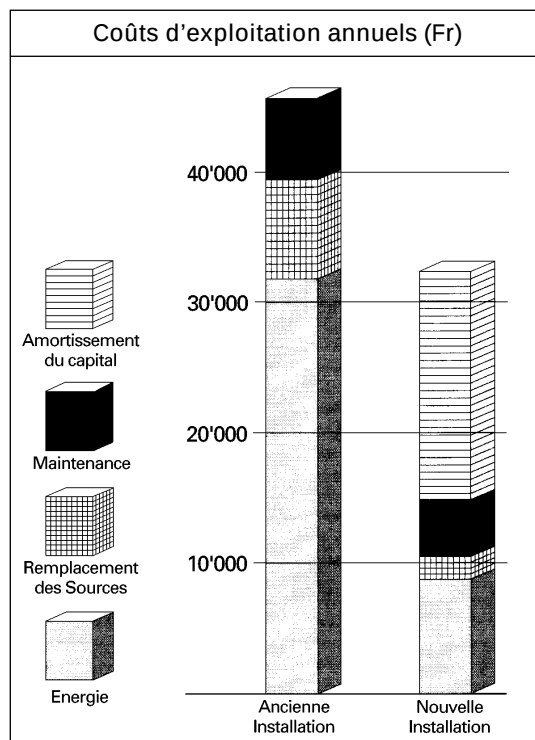
La nouvelle installation doit permettre de réaliser de substantielles économies d'énergie, du fait notamment de la diminution importante de la puissance installée dans les locaux ($P_i = 9...12 \text{ W/m}^2$ au lieu de 25 W/m^2 dans les bureaux).

Une comparaison des consommations estimées des deux installations dans les locaux de bureaux est donnée dans la table suivante: l'économie annuelle d'énergie attendue est de 75%.

Caractéristiques des bureaux	Ancienne installation	Nouvelle installation
Puissance de raccordement au réseau	103 kW	34 kW
Consommation annuelle	170000 kWh	45000 kWh

■ Analyse des coûts

La figure suivante donne un aperçu des coûts d'exploitation comparés des deux installations, pour ce qui concerne les locaux de bureaux (rez-de-chaussée et 5 étages supérieurs). On remarque, en particulier, la diminution considérable du coût énergétique de l'installation d'éclairage obtenue par la rénovation.





Pour ces mêmes locaux, le bilan financier de l'opération s'établit comme suit:

Hypothèses de calcul

Durée de vie de l'installation	15 ans
Taux d'intérêts	7 %
Coût du kWh électrique	11 ct (jour), 6ct (nuit)
Taux de renchérissement annuel	5 %
Taux de renchérissement de l'électricité	5 %

Calcul de l'amortissement

Investissement global	159'000.–
Amortissement des investissements	17'520.–
Economies annuelles sur les frais d'exploitation	7'800.–
Economies annuelles sur les coûts énergétiques	23'110.–
Temps de retour	8 ans

La même analyse appliquée à l'ensemble de l'installation indique un temps de retour identique (investissement global: 690'000.–, économies annuelles: 85'700.–).

BIBLIOGRAPHIE

A. Piazza, «Projektstudie RAVEL 22.51C - Kurzfassung der vollständigen Studie», Piazza Ing. AG, Biel (1992).



4. EVALUATION GLOBALE DU PROJET D'ÉCLAIRAGE 87

■ 4.1 Démarche générale	89
■ 4.2 Coûts d'investissement	90
■ 4.3 Coûts d'exploitation	91
■ 4.4 Economies d'énergie	92
■ 4.5 Retombées secondaires	95



4. ÉVALUATION GLOBALE DU PROJET D'ÉCLAIRAGE

4.1 DÉMARCHE GÉNÉRALE

Pour aborder un projet d'éclairage, il est nécessaire d'établir un inventaire tenant compte des conditions propres au projet et des buts à atteindre. Les éléments architecturaux tels que module, hauteur, couleur, ainsi que les niveaux de prestation, détermineront les premiers choix.

L'inventaire des locaux, leur utilisation, le niveau d'éclairement requis et les conditions particulières à respecter seront établis. Dans notre cas de figure, le niveau d'éclairement sera de 300 Lux. Le choix d'un niveau d'éclairement, conforme aux besoins est le premier critère d'économie d'énergie. Le choix de la source lumineuse est aussi important: son efficacité peut varier de 10 à 200 lm/W. L'utilisation contrôlée de l'éclairage naturel permet de limiter la consommation d'électricité. En effet, la commande de l'installation en fonction de l'apport de lumière naturelle permet de doser très exactement la contribution de l'éclairage artificiel, afin que les deux sources combinées livrent un niveau d'éclairement adéquat. Il en résulte un confort d'utilisation optimal et une minimalisation de la consommation d'énergie.

De cet ensemble de conditions, différentes variantes de solutions apparaîtront. Elles seront analysées sur la base des critères fondamentaux suivants:

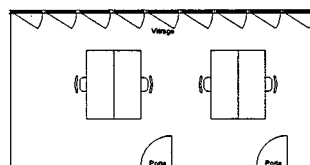
- conformité sur le plan technique
- obtention du confort visuel
- investissement initial
- économies d'énergie
- facilité d'entretien
- aspect esthétique

Pour un projet donné, les solutions correspondant à ces critères seront analysées.

Variantes d'éclairage envisagées

- Éclairage direct au moyen de tubes 36W
- Éclairage direct au moyen de tubes 58W
- Éclairage direct au moyen de PL 4x18W
- Éclairage direct/indirect par tubes 36W
- Éclairage indirect par tubes 36W
- Éclairage indirect par lampadaires à source HQI 150W (halogénures métalliques) et lampe d'appoint (tubes compacts).

Local considéré



Principales caractéristiques

Surface:	50 m ²
Niveau d'éclairement:	300 lux
Coefficient d'utilisation:	0,65
Rendement des luminaires:	0,7
Facteur de dépréciation:	0,8

Le premier point d'analyse concernera les investissements initiaux pour les différentes variantes.



4.2 COÛTS D'INVESTISSEMENT

Pour déterminer ces coûts, interviennent les éléments suivants:

- installations
- appareillage
- montage
- sources lumineuses

Pour la dernière variante (éclairage indirect), nous admettrons que le niveau d'éclairement ne soit pas uniforme, mais ponctuellement suffisant; on le supposera complété par une lampe de table équipée d'un tube à faible consommation (lampe compacte).

Une suite de comparaisons nous amènera à déterminer la solution la plus avantageuse sur le plan économique. Ce critère n'est cependant pas le seul à entrer en ligne de compte pour le choix de la solution définitive.

Variantes	Nbre luminaires	Coût lustrerie	Coût auxiliaire	Coût installation	Investis- sement
	[.]	[Fr.]	[Fr.]	[Fr.]	[Fr.]
Direct 2x36W	6	1'244.–	324.–	900.–	2'468.–
Direct 1x58W	8	1'792.–	195.–	1'200.–	3'187.–
Direct PL 4x18	8	2'856.–	260.–	1'200.–	4'316.–
Dir./ind. 2x36W	10	1'460.–	430.–	1'800.–	3'690.–
Indirect 2x36W	16	2'340.–	688.–	2'880.–	5'908.–
Lampadaire 150W	4	3'920.–	–.–	600.–	4'520.–

Figure 4.1: Tableau des investissements initiaux

Chaque variante du projet a des caractéristiques techniques bien distinctes: puissance, durée de vie des tubes et ampoules, prix du matériel à vieillissement programmé, usure du matériel selon le nombre et le type d'allumages.

La comparaison des systèmes de commande sera établie en fonction des possibilités d'utilisation des locaux:

- allumage par un ou plusieurs groupes (tout ou rien);
- allumage par détecteur de mouvement;
- allumage par commande programmée;
- commande régulée par un potentiomètre et ou par une cellule photométrique asservie à la lumière naturelle.

Chacune de ces solutions peut présenter, dans son cas propre d'utilisation, des avantages techniques et économiques.

Notre évaluation (voir figure 4.1) tient compte du coût de la lustrerie, des frais de pose, d'adaptation des fixations et du plafond, et du coût des lignes (tarif forfaitaire USIE).



4.3 COÛTS D'EXPLOITATION

■ Entretien

Le projeteur doit, dès le début de son étude, se soucier des problèmes d'entretien. Une installation d'éclairage doit, en effet, être facilement accessible; la conception globale doit être simple et claire.

Le matériel choisi sera démontable et devra garantir la possibilité d'un travail, dans des conditions supprimant tout risque de casse (attache des écrans, facilité d'échange des tubes et ampoules). Le choix du matériel sera le plus uniforme possible, afin de limiter le stock au maximum et d'éviter des recherches compliquées lors de dépannages.

Dans les endroits particulièrement difficiles d'accès, on utilisera des lampes à très longue durée de vie (lampes à induction, par exemple, durée de vie de 60'000 h.). Une comparaison financière entre l'investissement et le coût d'exploitation sera établie pour justifier ce choix.

Dans les locaux de prestige et de travail, le remplacement systématique des sources lumineuses sera réalisé au 4/5^e de la durée de vie des tubes et ampoules, d'une part pour éviter les remplacements sporadiques coûteux, et pour assurer le confort voulu par le projeteur d'autre part.

Les tubes et ampoules remplacés seront utilisés dans des locaux secondaires tels que dépôts, sous-sol, etc. Les appareils auxiliaires, à durée de vie limitée, seront également remplacés par la même occasion.

■ Nettoyage

Les luminaires modernes sont équipés de réflecteurs de qualité, étudiés aussi bien dans leurs formes que dans leurs matériaux. L'empoussiérage provoque une baisse de rendement du luminaire pouvant atteindre 30%.

Un luminaire avec un rendement de 80%, peut devenir un luminaire médiocre après un temps relativement court. Le nettoyage de l'écran et du réflecteur sera réalisé lors de l'échange des tubes et ampoules. Le remplacement systématique des tubes et ampoules favorise cette façon de faire.

■ Maintenance

Les coûts de maintenance d'une installation d'éclairage doivent tenir compte de tous les éléments liés à son entretien:

- coût de remplacement des sources;
- coût de remplacement des accessoires;
- coût de nettoyage.

Ces différents coûts sont ramenés à l'année; une comparaison permet d'évaluer l'intérêt de chaque solution. Les hypothèses de calcul sont les suivantes:

- coût de maintenance (base d'utilisation 1800 h./an);
- remplacement des tubes et appareils auxiliaires (durée de 15 min.);
- nettoyage des luminaires tous les 2 ans (durée de 15 min.).



Variantes	Nbre luminaires	Durée de vie des sources	Coût entretien annuel
	[-]	[h]	[Fr.]
Direct 2x36W	6	6000	158.–
Direct 1x58W	8	6000	202.–
Direct PL 4x18W	8	8000	298.–
Dir./ind. 2x36W	10	6000	264.–
Indirect 2x36W	16	6000	423.–
Lampadaire 150W	4	12000	145.–

Fig. 4.2: Coûts de maintenance des différentes variantes.

4.4. ECONOMIES D'ÉNERGIE

■ Consommation électrique liée à l'éclairage

La consommation d'énergie liée à l'éclairage est un facteur important.

Le choix de sources à haut rendement est primordial, mais pas toujours possible. En effet, des problèmes de confort, de couleur, nécessitent des options différentes dans certains cas. Les critères fonctionnels et utilitaires doivent toutefois être distingués.

Dans le premier cas, la source lumineuse sera choisie en fonction de critères, tels que le rendu des couleurs, le niveau de puissance de la source et l'aspect esthétique. Dans le second cas, seul l'aspect économique interviendra et la source au meilleur rendement prévaudra.

Le système de commande influe également sur la consommation. Un allumage en tout ou rien, ou un allumage contrôlé et régulé automatiquement, influence la consommation d'énergie de façon substantielle.

Une bonne utilisation de l'éclairage naturel implique une régulation automatique de l'éclairage artificiel. L'équipement des luminaires, au moyen de ballasts HF et d'une régulation sur la lumière du jour, assurera, d'une part un confort visuel approprié pour des travaux à l'écran, et d'autre part une économie d'énergie.

Consommation d'énergie de tubes fluorescents munis de ballasts HF

Pour des tubes TL 36W:

Éclairage en %	100	75	50	25	10
Énergie en %	100	82	62	45	35

L'expérience a démontré que l'amortissement d'une telle installation peut être garanti en 8 - 10 ans. Ce n'est d'ailleurs pas le seul avantage, car le tube exploité en HF a une durée de vie de douze à quinze mille heures, ce qui entraîne une diminution des interventions de remplace-



ment et contribue à la sauvegarde des matières premières (moindres quantités de déchets à éliminer).

Dans les zones de circulation ou locaux à faible utilisation, l'emploi de détecteurs de mouvement est une source d'économie importante.

La consommation d'énergie est donc en résumé, directement liée aux facteurs suivants:

- niveau d'éclairement;
- choix de la source lumineuse;
- rendement du luminaire;
- entretien du luminaire;
- système de commande.

Toujours basée sur les critères initiaux, la consommation d'énergie de nos différentes variantes peut être déterminée (kWh. à Fr. 0,20; durée de fonctionnement annuel de 1800 heures; taux d'intérêt 7%; durée de vie 15 ans; renchérissement annuel 5 %; rench. du coût de l'électricité 5 %).

L'ensemble des critères purement financiers ayant été abordés, nous pouvons établir un tableau récapitulatif global de notre projet.

Variantes	Puissance totale	Puissance installée	Coût énergétique annuel
	[W]	[W/m2]	[Fr.]
Direct 2x36W	480	9,6	245.–
Direct 1x58W	480	9,6	245.–
Direct TL 4x18	640	12,8	327.–
Semi-ind.2x36W	800	16,0	409.–
Indirect 2x36W	1280	25,6	654.–
Lampadaire 150W	800	16,0	409.–

Figure 4.3: Coût énergétique des différentes variantes

N°	Variantes	Annuités	Coût d'entretien annuel	Coût énergétique annuel
		[Fr.]	[Fr.]	[Fr.]
1	Direct 2x36W	271.–	158.–	245.–
2	Direct 1x58W	350.–	202.–	245.–
3	Direct PL 4x18W	475.–	298.–	327.–
4	Semi-Ind. 2x36W	406.–	264.–	409.–
5	Indirect 2x36W	650.–	423.–	654.–
6	Lampadaire 150W	497.–	145.–	409.–

Figure 4.4: Tableau récapitulatif des différents coûts (coeff. d'annuité: 0.11; coeff. moyen de renchérissement: 1.42)



Le choix définitif sera effectué sur la base de considérations économiques (investissement, entretien, énergie), mais également de confort et d'esthétique.

Dans notre cas de figure, nous choisirons la variante 1, assortie de ballasts HF (variante 1a), ou la variante 6.

Les expériences pratiques ont permis des économies d'énergie atteignant 60% lors d'utilisation de ballasts HF. Nous nous basons sur une économie estimée de 40 % en moyenne et pouvons établir à nouveau notre tableau récapitulatif.

Il en est de même pour la variante 6: l'allumage individuel permet une responsabilisation de l'utilisateur et, expérience faite, assure un emploi plus rationnel de l'énergie si l'utilisateur est suffisamment motivé. Nous avons observé, dans ce cas, des économies atteignant 50%; nous supposons une économie potentielle de 30%.

Compte tenu de cela, le tableau de décision se présente comme suit:

N°	Variante	Annuités	Coût d'entretien annuel	Consommation annuelle	Coût énergétique
			[Fr.]	[kWh]	[Fr.]
1	Direct 2x36W	271.–	158.–	864	245.–
1a	Direct 2x36W HF	356.–	124.–	518	147.–
6	Lampadaire 150W (100%)	497.–	145.–	1440	409.–
6a	Lampadaire 150W (70%)	497.–	117.–	1008	286.–

Figure 4.5: Tableau récapitulatif des divers coûts, tenant compte des économies potentielles d'énergie.

Dans notre cas, nous choisirons la variante 1a bien que celle-ci soit moins souple que la variante 6a: la différence de temps de retour de l'une par rapport à l'autre est, en effet, de 14 ans en faveur de la 1ère variante.

■ Apports internes

Dans les coûts indirects des différentes variantes, l'aspect thermique des sources lumineuses intervient. Le dégagement de chaleur n'est souvent pas négligeable.

La figure 4.6 illustre cela pour les différentes variantes considérées.

Puissance nominale	TL36W	TL58W	PL18W	HQI 150W
Dégagement thermique [W]	25	41	12,5	90

Figure 4.6: Dégagement de chaleur des différentes sources envisagées.

La solution idéale consiste à placer les luminaires dans le flux d'extraction de l'air vicié, afin d'éliminer la chaleur et de la récupérer. Ceci présente un avantage certain du point de vue théorique (rendement des luminaires, récupération de chaleur); l'expérience a toutefois montré que cette solution est caractérisée par un inconvénient majeur: l'encrassement des luminaires (perte de rendement).



En hiver, par contre, la chaleur dégagée doit être maintenue dans le local et contribuer aux gains d'énergie internes.

4.5 RETOMBÉES SECONDAIRES

Les critères techniques et financiers de notre projet étant définis, une analyse des qualités et défauts des solutions préconisées reste à faire pour le cas étudié.

Le niveau de confort visuel est un élément important, qui ne peut être quantifié, mais qui demeure une préoccupation, aussi importante que le niveau d'éclairement ou l'économie d'énergie.

La disposition des sources lumineuses, ainsi que leur choix, doivent être soigneusement étudiés et adaptés aux besoins de chaque contexte.

En supprimant la fatigue oculaire, il a été démontré que l'on augmentait le bien-être et la productivité des personnes; on réduit, par ailleurs, les risques d'accident. Un éclairage bien étudié et correctement réalisé peut être un outil de productivité permettant à l'entreprise de conquérir un avantage concurrentiel.

L'aspect esthétique de jour et de nuit est également important, car il représente, autant de l'intérieur que de l'extérieur du bâtiment, une image de marque non négligeable.

La mise en valeur des couleurs, par un choix de sources lumineuses adéquates, est aussi un élément d'appréciation d'un local, qui favorisera l'ambiance de travail ou la présentation de produits. L'éclairage artificiel est un complément à l'éclairage naturel et doit dans tous les cas possibles, être utilisé comme tel.

Ainsi, le projeteur aura réalisé une tâche délicate puisqu'il aura, par son projet, réalisé à la fois:

- un éclairage économique;
- un éclairage esthétique;
- un éclairage stimulant.

Une analyse systématique des critères énoncés doit l'aider à y parvenir.



5. CHECKS-LIST 97

- 5.1 Check-list «Éclairage naturel» 99
- 5.2 Check-list «Éclairage artificiel» 101



5. CHECKS-LIST

5.1 CHECK-LIST «ECLAIRAGE NATUREL»

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

Critères	Oui	Non
☐ Environnement A-t-on pris en compte les caractéristiques climatiques du site d'implantation du bâtiment (couverture nuageuse et ensoleillement annuel)? A-t-on répertorié les masques constitués par l'environnement (position, hauteur, photométrie)? A-t-on tenu compte de la photométrie du sol environnant (facteur de réflexion, brillance)? A-t-on répertorié les vue intéressantes offertes par le site?	☐ ☐ ☐ ☐	
☐ Matériaux Les ouvertures qui apportent de la lumière naturelle sont-elles munies de verres clairs? L'emploi de verres teintés ou réfléchissants est-il limité aux ouvertures qui procurent une vue vers l'extérieur? S'est-on assuré qu'il n'y ait pas mélange de plusieurs teintes de vitrages dans un même local? Si le vitrage est opalescent (diffusant), est-il situé hors du champ visuel de l'observateur lorsque celui-ci est à son poste de travail (éblouissement)? A-t-on pensé à utiliser un matériau de type «isolation translucide»?	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	
☐ Parois du local Les facteurs de réflexion du plafond, des murs et du sol sont-ils appropriés (égaux ou supérieurs à 0.7, 0.5 et 0.30)? Les parois situées à proximité des ouvertures (notamment du sol) sont-elles traitées avec des teintes chaudes?	☐ ☐	
☐ Systèmes de captation Les éléments destinés à réfléchir et dévier la lumière sont-ils brillants? Les éléments destinés à réfléchir et dévier la lumière sont-ils clairs (facteur de réflexion supérieur à 0.7)? Les éléments destinés à réfléchir et dévier la lumière sont-ils de teinte chaude?	☐ ☐ ☐	



Critères	Oui	Non
■ Protections solaires		
Y a-t-il une protection contre les pénétrations solaires directes placée à l'extérieur?	☐	
■ Protection fixe		
La protection est-elle assurée pendant toute la saison chaude?	☐	
Les éblouissements sont-ils éliminés en hivers	☐	
Les performances par ciel couvert sont-elles satisfaisantes?	☐	
Les vues vers l'extérieur sont-elles conservées?	☐	
■ Protection mobile		
Dans le cas de stores en tissu, le facteur de transmission énergétique est-il inférieur à 15%?	☐	
Dans le cas de stores à lames horizontales, les lames peuvent-elles réfléchir et dévier la lumière?	☐	
Si la commande des stores est automatique, les utilisateurs ont-ils la possibilité de reprendre la main?	☐	
En cas de panne, cela risque-t-il d'entraîner des désordres?		☐
Si la commande des stores est manuelle, la manipulation nécessite-t-elle un apprentissage long?		☐
En cas de non utilisation, cela risque-t-il d'entraîner des désordres (problèmes thermiques notamment)?		☐
■ Protection semi-mobile		
La manipulation du système par le service d'exploitation est-elle envisageable?	☐	
■ Ouvertures en façade		
Une allège basse (< 50 cm) est-elle justifiée par une vue intéressante vers le bas?	☐	
En cas d'allège standard (90 cm), se sert-on de la tablette pour réfléchir la lumière en direction du plafond?	☐	
Si oui, s'est-on assuré que les reflets ne seront pas gênants?	☐	
Si l'allège est très haute (> 150 cm), a-t-on envisagé de découper en biais la tablette intérieure?	☐	
A-t-on réduit la retombée du linteau ou créé un biais dans celui-ci?	☐	
Si le mur est épais, a-t-on envisagé de créer un biais dans l'embrasure	☐	
A-t-on envisagé la possibilité de créer un biais dans le faux plafond?	☐	
■ Ouvertures en toiture		
A-t-on utilisé un matériau de type «isolation translucide»?	☐	
La hauteur des costières est-elle réduite au minimum?	☐	
Est-il possible de créer un biais dans l'épaisseur de la toiture?	☐	



Critères	Oui	Non
■ Atrias Les ouvertures donnant sur l'atrium sont-elles largement dimensionnées? L'atrium est-il évasé vers le haut? Les coursives sont-elles situées le long des parois de l'atrium? Les parois de l'atrium sont-elles claires?	• • • •	•

5.2 CHECK-LIST «ECLAIRAGE ARTIFICIEL»

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

Critères	Oui	Non
■ Éclairage du local Le niveau d'éclairement horizontal est-il compris entre 300 et 500 lx? A-t-on réduit la puissance installée de l'éclairage artificiel à sa valeur minimale? A-t-on tiré profit des possibilités d'éclairage à la tâche? L'intensité de l'éclairement vertical est-elle en bonne proportion par rapport à l'éclairement horizontal? La répartition des luminances est-elle harmonieuse? La couleur de la lumière est-elle «blanc neutre» ou «blanc chaud»? Les luminaires fluorescents sont-ils équipés de ballasts à haute fréquence? Les luminaires pour un éclairage direct sont-ils commandés par rangée? Les luminaires provoquent-ils des luminances trop élevées? Les luminaires pour un éclairage direct sont-ils disposés en rangées parallèles aux fenêtres? La commande adoptée tient-elle compte de la lumière naturelle et/ou de l'horaire d'utilisation des locaux? ■ Surfaces délimitant le local Les facteurs de réflexion des surfaces délimitant le local sont-ils supérieurs aux valeurs limites? Y a-t-il des stores à lamelles extérieurs et/ou des rideaux? Si deux murs à angle droit ont des fenêtres, est-il possible de cacher ou d'obscurcir entièrement une rangée de fenêtres?	• • • • • • • • • • • • • • • • •	•



Critères	Oui	Non
Le plan de travail est-il mat et de couleur neutre?	•	
Y a-t-il des parois mobiles permettant, le cas échéant, de subdiviser le local de manière fonctionnelle?	•	
Local et écran		
L'écran est-il placé de façon à ce que le regard de l'opérateur soit dirigé vers un arrière-plan plus clair?		•
Y a-t-il des reflets de luminaires ou de fenêtres à la surface de l'écran, sur le clavier, sur le document ou sur le bureau?		•
L'écran est-il placé de telle façon que l'éclairage du local éblouisse l'opérateur?		•
L'écran est-il placé de façon à ce que l'axe principal du regard soit parallèle aux rangées de luminaires d'un éclairage direct?	•	
Les rapports de contrastes sont-ils bons?	•	
Y a-t-il absence de scintillement lorsque l'éclairage est enclenché?	•	
Un contact optique suffisant avec les postes de travail et les écrans voisins est-il garanti?	•	
Voit-on à l'extérieur dans une direction quelconque?	•	
Les utilisateurs ont-ils été mis au courant des réglages possibles et de l'entretien nécessaire de leur éclairage?	•	

Associations de soutien

ASE

Association suisse
des électriciens

Sia

Société suisse
des Ingénieurs et des Architectes

SLG

Association suisse
de l'éclairage



Union technique suisse