



HAL
open science

Eclairage et vision.

R. Floru

► **To cite this version:**

R. Floru. Eclairage et vision.. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 149, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 1996, 135 p., ill., bibliogr. hal-01420151

HAL Id: hal-01420151

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420151>

Submitted on 20 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DECEMBRE1996

N° ISSN 0397 - 4529

149

**ECLAIRAGE
ET VISION**

Robert FLORU

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE

**SIEGE SOCIAL :
30, RUE OLIVIER-NOYER, 75680 PARIS CEDEX 14**

**CENTRE DE RECHERCHE :
AVENUE DE BOURGOGNE, 54501 VANDŒUVRE CEDEX**

SOMMAIRE

ECLAIRAGE ET VISION

AVANT-PROPOS : par J.C. Cnockaert

FICHE n° 0 : PRESENTATION GENERALE DU FICHIER	1
1. Motivation	1
2. Objectifs	1
3. Environnement lumineux du travail	2
4. Eclairage, sécurité et santé	2
4.1. <i>Eclairage et sécurité</i>	2
4.2. <i>Eclairage et santé</i>	3
FICHE n° 1 : ECLAIRAGE ET TRAVAIL	5
1. Ergonomie visuelle et éclairage	5
2. Tâche visuelle	5
3. Visibilité et performance visuelle	6
4. Confort visuel et satisfaction visuelle	7
5. Environnement lumineux et visibilité	7
6. Capacités visuelles	8
FICHE n° 2 : LUMIERE	9
1. Nature de la lumière	9
2. Sources de lumière	9
3. Grandeurs photométriques et unités de mesure	9
4. Méthodes photométriques de mesurage	11
4.1. <i>Mesurage de l'éclairement</i>	11
4.2. <i>Mesurage de la luminance</i>	12
4.3. <i>Mesurage de la visibilité</i>	12
FICHE n° 3 : OEIL ET VISION	17
1. L'oeil dans le système visuel	17
2. Structure de l'oeil	17
3. Fonctions optiques	18
3.1. <i>Accommodation</i>	18
3.2. <i>Erreurs de réfraction</i>	19
4. Fonctions sensorielles	19
4.1. <i>Récepteurs photosensibles</i>	19
4.2. <i>Sensibilité au contraste</i>	20
4.3. <i>Résolution temporelle</i>	20
4.4. <i>Sensibilité spectrale</i>	20
4.5. <i>Adaptation</i>	21
4.5.1. <i>Adaptation à l'obscurité</i>	21
4.5.2. <i>Mécanisme de l'adaptation à l'obscurité</i>	21
4.5.3. <i>Adaptation à la lumière</i>	22

4.6. <i>Rôle de la pupille</i>	22
5. Fonctions motrices	22
5.1. <i>Réflexe de fixation</i>	22
5.2. <i>Mouvements oculaires</i>	22
5.2.1. Microsaccades	22
5.2.2. Saccades	23
5.2.3. Poursuite	23
5.3. <i>Vision binoculaire</i>	23
6. Rôle du système nerveux	23

FICHE n° 4 : APTITUDES VISUELLES 37

1. Acuité visuelle	37
2. Résistance à l'éblouissement	38
3. Vision des couleurs	38
4. Champ visuel	38
5. Perception visuelle	39
6. Modification des capacités visuelles avec l'âge	39
6.1. <i>Accommodation</i>	40
6.2. <i>Acuité visuelle, adaptation et discrimination chromatique</i>	40
6.3. <i>Champ visuel et perception de l'espace</i>	41
7. Implications professionnelles	41

FICHE n° 5 : TYPES ET SYSTEMES D'ECLAIRAGE 47

1. Eclairage naturel	47
2. Classification des systèmes d'éclairage	48
2.1. <i>Classification selon la disposition et la localisation</i>	48
2.1.1. Eclairage général	48
2.1.2. Eclairage localisé	48
2.1.3. Eclairage local (éclairage d'appoint)	48
2.2. <i>Classification selon la fraction du flux lumineux atteignant directement le plan de travail</i>	49
2.2.1. Eclairage direct	49
2.2.2. Eclairage semi-direct	49
2.2.3. Eclairage général diffus (mixte)	49
2.2.4. Eclairage semi-indirect	49
2.2.5. Eclairage indirect	50

FICHE n° 6 : ECLAIRAGE QUANTITATIF 55

1. Observations préliminaires	55
1.1. <i>Luminance et éclairement</i>	55
1.2. <i>Critères de choix</i>	55
1.3. <i>Evaluation de la qualité d'un éclairage</i>	56
2. Niveaux d'éclairages recommandés	56
2.1. <i>Valeurs minimales stipulées par les textes officiels</i>	56
2.1.1. Code du Travail, art. R.232-7-2	56
2.1.2. Circulaire du 11.04.1984	56
2.2. <i>Valeurs moyennes visant à assurer la sécurité et à éviter la fatigue visuelle</i>	56
2.2.1. Niveaux d'éclairement	56
2.2.2. Rapports d'éclairement	57
3. Recommandations de la C.I.E.	57
3.1. <i>Surface de référence</i>	58
3.2. <i>Critères de choix</i>	58

3.2.1. Valeur moyenne	58
3.2.2. Valeurs maximales	58
3.2.3. Valeurs minimales	58
4. Niveaux d'éclairage recommandés par l'A.F.E.	58
4.1. <i>Uniformité spatiale</i>	59
4.1.1. Facteur d'uniformité	59
4.1.2. Rapports d'éclairage	60
4.1.3. Distribution de l'éclairage sur les parois du local	60

FICHE n° 7 : ECLAIRAGE QUALITATIF 61

1. Direction de la lumière	61
2. Aspects qualitatifs de l'éclairage	61
2.1. <i>Distribution spatiale de la lumière</i>	62
2.2. <i>Rapports de luminance</i>	62
2.2.1. Exigences visuelles	62
2.2.2. Détermination du contraste	63
2.2.3. Rendu du contraste	63
3. Couleur	63
3.1. <i>Chromaticité d'une source</i>	63
3.2. <i>Température de couleur</i>	63
3.3. <i>Rendu des couleurs</i>	64
3.4. <i>Contraste chromatique</i>	64
3.5. <i>Résumé</i>	64
4. Aspects quantitatifs et qualitatifs dans la conception de l'éclairage	64
4.1. <i>Tâche visuelle</i>	65
4.2. <i>Zone dans laquelle s'effectue la tâche visuelle</i>	65
4.3. <i>Sélection et disposition des sources lumineuses</i>	65
4.3.1. Disposition des sources d'éclairage	65
4.3.2. Avantages et limites des systèmes d'éclairage	65
4.3.2.1. <i>Systèmes d'éclairage uniforme</i>	65
4.3.2.2. <i>Systèmes d'éclairage non uniforme</i>	66

FICHE n° 8 : EBLOUISSEMENT ET CONFORT VISUEL 69

1. Phénomène d'éblouissement	69
1.1. <i>Types d'éblouissements</i>	69
1.2. <i>Facteurs déterminants et favorisants</i>	69
1.2.1. Facteurs qui contribuent à la diminution du contraste	70
1.2.1.1. <i>Tâche visuelle</i>	70
1.2.1.2. <i>Position de l'opérateur</i>	70
1.2.1.3. <i>Système d'éclairage</i>	70
1.3. <i>Conséquences de l'éblouissement</i>	70
1.3.1. Pour le confort visuel	70
1.3.2. Pour la visibilité	71
1.3.3. Pour la charge de travail	71
1.4. <i>Mécanismes physiologiques</i>	71
2. Evaluation de l'éblouissement gênant	71
2.1. <i>Système de la probabilité du confort visuel</i>	72
2.2. <i>Système de la courbe de luminance</i>	72
3. Contrôle de l'éblouissement	72
3.1. <i>Contrôle de la luminance des luminaires et exigences visuelles des tâches</i>	72
3.2. <i>Contrôle de la luminance des lampes</i>	73
3.2.1. Protection	73
3.2.2. Déflecteurs	73
3.2.3. Matériaux translucides	73

3.2.4. Eclairage indirect	74
4. Prévention de l'éblouissement gênant	74
4.1. <i>Protection contre l'éblouissement gênant direct</i>	74
4.2. <i>Limitations de luminance pour les plafonds</i>	75
4.3. <i>Eclairage d'appoint</i>	75
5. Evitement ou réduction de l'éblouissement par réflexion	75
6. Facteurs de réflexion recommandés par l'A.F.E.	75
7. Résumé	75

FICHE n° 9 : PLAINTES, TESTS ET REMEDES 79

1. Stratégie d'analyse des plaintes	79
2. Analyse des situations	80

FICHE n° 10 : ECLAIRAGE DANS LES LOCAUX INDUSTRIELS 89

Introduction	89
1. Eclairage	89
1.1. <i>Niveau d'éclairage</i>	89
1.2. <i>Sélection du niveau d'éclairage</i>	90
2. Distribution des luminances	91
2.1. <i>Limitation de l'éblouissement</i>	91
2.1.1. Eblouissement direct	91
2.1.2. Eblouissement par réflexion	91
3. Ombres	92
4. Systèmes d'éclairage	92
4.1. <i>Eclairage général et localisé</i>	92
4.2. <i>Eclairage direct, semi-direct et indirect</i>	92
5. Eclairage local pour des tâches visuelles spécifiques	92
5.1. <i>Exigences de la tâche</i>	92
5.2. <i>Luminaires pour l'éclairage local</i>	92
6. Tâches visuelles et exigences d'éclairage	93
7. Effets spéciaux et techniques	95

FICHE n° 11 : ECLAIRAGE DES BUREAUX 97

1. Bureaux traditionnels	97
1.1. <i>Exigences visuelles de la tâche</i>	97
1.2. <i>Environnement lumineux</i>	98
1.2.1. Niveaux d'éclairage	98
1.2.2. Qualité de l'éclairage	98
1.2.3. Rapport de luminance	98
1.2.4. Recommandations pour les bureaux sans écran de visualisation	99
1.2.5. Bureaux de dessin	99
2. Bureaux avec écrans de visualisation	99
2.1. <i>Tâches informatisées</i>	99
2.2. <i>Environnement lumineux</i>	100
2.2.1. Niveaux d'éclairage	100
2.2.2. Luminances	100
2.2.3. Réflexions	101
2.2.4. Recommandations pour les postes de travail sur écran	102

FICHE n° 12 : LAMPES ET LUMINAIRES	103
1. Lampes	103
1.1. <i>Critères de choix des lampes</i>	103
1.1.1. Caractéristiques des lampes	103
1.1.2. Avantages et inconvénients de différentes familles de lampes	103
1.1.2.1. <i>Lampes à incandescence</i>	103
1.1.2.2. <i>Lampes fluorescentes</i>	104
1.1.2.3. <i>Lampes à décharge</i>	104
1.1.3. Evolution des caractéristiques	104
2. Luminaires	105
2.1. <i>Structure fonctionnelle des luminaires</i>	105
2.2. <i>Critères de choix des luminaires</i>	106
2.3. <i>Dépréciation des installations</i>	106
FICHE n° 13 : FATIGUE VISUELLE	107
1. Fatigue visuelle - problème de santé	107
2. Fatigue générale et fatigue visuelle	107
2.1. <i>Fatigue générale</i>	107
2.2. <i>Fatigue visuelle</i>	108
3. Manifestations subjectives et objectives de fatigue visuelle	108
3.1. <i>Phénomènes subjectifs</i>	108
3.2. <i>Indices physiologiques de fatigue visuelle</i>	108
3.2.1. Accommodation	108
3.2.2. Sensibilité au contraste	108
3.2.3. Acuité visuelle	109
3.2.4. Résistance à l'éblouissement	109
3.2.5. Diamètre pupillaire	109
3.2.6. Mouvements oculaires, vergence, phories	109
3.2.7. Clignements palpébraux	109
3.2.8. Fréquence critique de fusion	109
3.2.9. Potentiels évoqués visuels	110
3.3. <i>Performances perceptives</i>	110
4. Facteurs qui déterminent et favorisent la fatigue visuelle	110
4.1. <i>Charge visuelle de travail</i>	110
4.2. <i>Environnement lumineux</i>	110
4.3. <i>Présentation de l'information visuelle</i>	111
4.4. <i>Exigences visuelles de la tâche</i>	111
4.5. <i>Aménagement du poste de travail</i>	111
4.6. <i>Organisation du travail</i>	111
4.7. <i>Facteurs individuels</i>	111
4.7.1. Défauts visuels	111
4.7.2. Port de verres correcteurs	111
4.7.3. Age	111
4.7.4. Etat fonctionnel	111
5. Valeur et limites des indices de fatigue visuelle	111
5.1. <i>Pertinence des indices objectifs de fatigue visuelle</i>	112
5.2. <i>Insuffisances méthodologiques</i>	112
6. Mécanismes de la fatigue visuelle	113
6.1. <i>Fatigue musculaire</i>	113
6.2. <i>Fatigue sensorielle</i>	113
6.3. <i>Fatigue centrale</i>	113
7. Prévention	114
7.1. <i>Recommandations ergonomiques</i>	114
7.1.1. Environnement lumineux	114

7.1.2. Organisation du travail	114
7.2. <i>Surveillance médicale</i>	115
7.3. <i>Méthodologie</i>	115

FICHE n° 14 : EFFETS PHOTOBIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS OPTIQUES	117
--	-----

1. Photobiologie et photothérapie	117
2. Rayonnement optique	118
2.1. <i>Sources de rayonnement optique</i>	118
2.1.1. Rayonnement solaire	118
2.1.2. Sources artificielles	119
3. Effets bénéfiques du rayonnement optique	119
3.1. <i>Synthèse de la vitamine D</i>	119
3.2. <i>Synchronisation des rythmes biologiques circadiens</i>	119
3.3. <i>Photothérapie des troubles affectifs saisonniers</i>	120
4. Effets traumatisants du rayonnement optique	120
4.1. <i>Effets sur les tissus oculaires</i>	120
4.1.1. Rayonnement ultraviolet	120
4.1.1.1. <i>Effets sur la cornée</i>	120
4.1.1.2. <i>Effets sur le cristallin</i>	121
4.1.1.3. <i>Effets sur la rétine</i>	121
4.1.2. Rayonnement visible et infrarouge	121
4.1.3. Rayonnement infrarouge B et C	122
4.2. <i>Effets cutanés</i>	123
4.2.1. Rayonnement ultraviolet	123
4.2.2. Rayonnement infrarouge	123
5. Photosensibilisation	123
6. Prévention	123

BIBLIOGRAPHIE	127
----------------------	-----

LEXIQUE	133
----------------	-----

A V A N T - P R O P O S

ECLAIRAGE et VISION est un ensemble de 15 fiches qui s'adressent à tous ceux qui doivent intervenir dans l'aménagement ergonomique de l'environnement lumineux au travail. Il constitue le résultat d'un travail de synthèse de nombreux documents cités en référence. Le classement et l'organisation des données et informations permettent d'accéder facilement à des notions qui sont utiles pour :

- choisir un éclairage adéquat ou évaluer un éclairage déjà installé,
- définir la nature des plaintes des opérateurs à propos de l'éclairage de leur poste de travail,
- identifier les écarts et apporter des remèdes,
- corriger des inadéquations entre l'environnement lumineux existant et celui exigé par la nature de la tâche,
- établir des demandes documentées aux éclairagistes pour adapter et moduler l'éclairage général et local aux besoins de visibilité, de confort et de satisfaction des opérateurs.

Le docteur Robert Floru, ancien chercheur à l'I.N.R.S., est l'auteur de cette synthèse ; son regard de psychophysiologiste du travail lui a permis d'analyser les relations dynamiques entre la quantité et la qualité de la lumière et le fonctionnement du système visuel qui recentrent, sur l'opérateur, la démarche de conception et de correction de l'environnement lumineux au poste de travail.

Serge Salsi et François Cail ont apporté leur contribution en lui fournissant certains documents de base et en participant à l'élaboration de l'iconographie. Enfin, le docteur Floru a bénéficié de leurs amicales critiques et des miennes.

J'espère que les présentes fiches seront utiles et contribueront à faciliter la communication entre d'une part les préventeurs, les ingénieurs et techniciens qui projettent, installent, maintiennent ou remanient les systèmes d'éclairage et d'autre part les ergonomes et les médecins de travail.

Jean-Claude Cnockaert
Chef du Service de Physiologie Environnementale

ECLAIRAGE ET VISION

FICHE n° 0

PRESENTATION GENERALE DU FICHIER

1. Motivation

Pour être capable de se déplacer et d'effectuer ses activités en sécurité, aisément et efficacement le travailleur doit être informé sur sa tâche et son environnement. Au poste de travail, plus de 80 % des messages nécessaires au bon déroulement de son activité professionnelle lui parviennent par voie visuelle. La perception des objets et des événements ainsi que l'exécution de différentes tâches s'effectuent sous le contrôle de la vue. Cette sollicitation des fonctions visuelles s'est encore accrue avec le développement de l'automatisation et de l'informatisation ; en effet, les activités professionnelles modernes comportent des tâches (surveillance, inspection et contrôle, détection des défauts ou d'erreurs, lecture sur écran de visualisation...) qui sollicitent, en priorité et de façon presque permanente, la *vision*.

La vision dépend de la *lumière* car c'est la lumière qui rend les objets visibles. Un éclairage approprié de la tâche visuelle, de l'environnement proche et des autres zones qui peuvent apparaître dans le champ visuel de l'opérateur lui permet de travailler *efficacement*, en conditions de *sécurité* et de *confort visuel*. Lorsque l'ambiance lumineuse n'est pas adaptée aux exigences de la tâche et aux aptitudes visuelles du travailleur, elle constitue un facteur supplémentaire de charge, générateur de fatigue visuelle, avec des conséquences sur la santé et la sécurité au travail. Les tâches qui comportent une prise d'information visuelle requièrent donc à la fois *une bonne vue et un environnement lumineux adéquat*.

En pratique, pour satisfaire à ces deux exigences, le médecin du travail contrôle périodiquement l'état ophtalmologique des opérateurs. De son côté, l'éclairagiste conçoit et implante des systèmes d'éclairage en fonction des normes, des recommandations ergonomiques ou des

besoins formulés par le bureau d'études. Parfois, il est à même d'intervenir à la suite des observations exprimées par les usagers.

Toutefois et malgré les remarquables progrès technologiques dans le domaine de l'éclairage, l'opérateur n'est pas toujours satisfait de l'ambiance visuelle dans laquelle il travaille ; la qualité de l'éclairage est souvent mise en cause. En effet, les enquêtes sur les conditions de travail signalent de nombreuses plaintes de la part des opérateurs travaillant dans les ateliers et dans les bureaux. Ces plaintes se réfèrent à la fois aux *troubles visuels et oculaires* ressentis, aux difficultés rencontrées dans l'exécution des tâches et aux *insuffisances de l'éclairage* au poste de travail.

2. Objectifs

Concevoir un éclairage adéquat, reconnaître et évaluer les insuffisances quantitatives et qualitatives d'un éclairage jugé insatisfaisant par les usagers, proposer des solutions pour y remédier constitue une tâche complexe et difficile à accomplir par une seule catégorie d'experts. Afin de *faciliter la communication* entre d'une part les préventeurs, les ingénieurs et techniciens qui projettent, installent, maintiennent ou remanient les systèmes d'éclairage et d'autre part les ergonomes et les médecins de travail, l'I.N.R.S a entrepris l'élaboration d'un ensemble de fiches intitulé **ECLAIRAGE et VISION**.

L'objectif final de ces fiches est de fournir ou rappeler un certain nombre de *connaissances à exploiter* lorsqu'il existe une volonté d'optimiser la charge visuelle de travail, de prévenir l'asthénie visuelle et de conserver le bien-être des salariés. Les fiches s'adressent à des personnes qui ne se contentent pas d'appliquer des normes ou des recommandations, mais désirent également *comprendre* à la fois les raisons scientifiques et la finalité pratique d'un choix afin d'améliorer la pertinence de leurs réalisations. Enfin, les fiches peuvent contribuer au corps de documents utilisés

pour la *formation* à la sécurité et à la prévention.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de connaître les relations entre lumière et vision et plus particulièrement :

- l'influence de la quantité, la qualité et la répartition de la lumière sur le *fonctionnement* du système visuel, la *visibilité* des objets, les *performances* visuelles et le *confort* visuel,
- les conséquences d'un éclairage inadéquat sur la *santé* et la *sécurité*.

Ces connaissances se réfèrent aux composantes physiques, physiologiques et psychologiques du comportement et la façon dont l'environnement lumineux influence la conduite de l'opérateur humain. Ainsi, la réception de l'information visuelle dépend à la fois des composantes optiques et neuro-sensorielles du système visuel et des conditions de leur fonctionnement pendant le travail, telles que les contrastes des luminances et chromatiques (tâche, zone de travail, environnement), les dimensions des détails à percevoir, les exigences temporelles... Les performances visuelles, la visibilité des formes et des couleurs, l'appréciation des contrastes et du relief, l'exécution précise et prompte des tâches sont tributaires, entre autres, de la nature, la disposition et l'orientation de sources lumineuses.

3. Environnement lumineux du travail

L'éclairage est un domaine d'application des connaissances scientifiques sur la lumière et la vision. Son objet est de concevoir et d'assurer un environnement lumineux optimal, adapté aux activités humaines. A la différence du bruit, l'éclairage n'est pas une nuisance, mais, dans l'ambiance de travail, un *mauvais éclairage* est un facteur potentiel de risque pour la sécurité et la santé. En effet, un éclairage inadéquat de la tâche et de l'environnement constitue un facteur de contrainte, générateur d'astreinte et de fatigue visuelle; il augmente la charge de travail et contribue au stress professionnel.

Un bon éclairage, naturel ou artificiel est indispensable à la prise et au traitement de l'information visuelle. Un bon éclairage permet d'identifier les facteurs de risque et réduit la probabilité de fatigue visuelle et

d'inconfort au travail ; il joue donc un rôle important dans la préservation de la santé et de la sécurité au travail. Cependant, une définition satisfaisante du "bon éclairage" ne peut être proposée avant de savoir à quoi et à qui il va servir. En effet, un bon éclairage n'est qu'un "modulateur" environnemental au service de l'homme. Dans cette optique, il est possible de définir un *bon éclairage* au travail en termes d'*éclairage adapté* aux :

- *exigences visuelles* de la tâche à effectuer,
- *conditions temporelles* du travail (durée de la tâche, variations du niveau d'éclairage, variations de l'état fonctionnel du travailleur),
- *aptitudes visuelles* des travailleurs.

De plus, un bon éclairage confère à l'environnement un caractère *agréable* et *confortable*.

A partir de ces exigences, il est possible de concevoir ou d'évaluer un bon éclairage en appliquant les connaissances psychophysiologiques sur la lumière et la vision aux activités humaines exercées dans diverses ambiances de travail. Dans cette perspective, le fichier ECLAIRAGE et VISION contient des recommandations visant à adapter l'environnement lumineux aux exigences visuelles des tâches ainsi que les avantages et les inconvénients des différents systèmes d'éclairage.

4. Eclairage, sécurité et santé

A partir du principe qu'un environnement lumineux doit être conçu pour s'adapter aux capacités humaines, un éclairage insuffisant, inadéquat ou de faible qualité, l'éblouissement direct ou indirect peuvent augmenter le *risque d'accidents*. En revanche, un éclairage adéquat peut diminuer ces risques car il peut retarder l'apparition de la fatigue visuelle et compenser dans une certaine mesure les limites fonctionnelles du système visuel (résistance à l'éblouissement, par exemple).

4.1. Eclairage et sécurité

Dans toutes les zones de travail et d'accès, les personnes doivent être capables de voir lorsqu'elles se déplacent, sans trébucher sur des obstacles et sans tomber. De même, les opérateurs sur machines ont besoin de voir

les pièces situées à une certaine distance ou de lire correctement les jauges ou les dispositifs. Plus rapidement et plus facilement un facteur de risque est vu, identifié et évalué, plus facilement il sera évité. Il convient donc de concevoir le niveau et le type d'éclairage nécessaire à la **sécurité** dans les zones de travail en fonction des *particularités du travail* effectué et de la *nature des risques* aigus et chroniques qui lui sont associés.

Note. L'éclairage des lieux de travail constitue une condition à respecter pour prévenir les accidents. Ainsi, le Code de Travail (Article R.232-6, Titre III, Chapitre II) stipule que : "Les locaux fermés affectés au travail, leurs dépendances et notamment les passages et escaliers doivent être éclairés dans des conditions suffisantes pour assurer la sécurité du travail et de la circulation". (A consulter également *Eclairage des lieux de travail*, synthèse établie par C. Soudry, INRS, DMT 30 TJ 13, 1995).

4.2. Eclairage et santé

Un mauvais éclairage peut provoquer une *fatigue visuelle* lorsqu'il oblige le système visuel à travailler dans des conditions inadaptées voire difficiles. Les rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge peuvent également provoquer des *lésions* des organes et tissus ou plus spécifiquement des yeux.

Fatigue visuelle. La fatigue visuelle apparaît plus fréquemment lorsque le système visuel doit travailler aux limites de ses capacités ou/et pendant une longue durée. Un éclairage inadéquat constitue un facteur supplémentaire de charge visuelle et contribue à l'apparition des signes de fatigue oculaire et visuelle. Cette fatigue se manifeste, entre autres, par des symptômes d'irritation des yeux et des paupières, des troubles visuels, des céphalées, par un affaiblissement de certaines fonctions visuelles, telles que la sensibilité au contraste, l'accommodation, etc. ainsi que par une diminution de l'efficacité au travail.

Lésions tissulaires. Les sources lumineuses génèrent des rayonnements optiques dans les zones infrarouge, visible et ultraviolet du spectre. En fonction de la nature de la source et de la durée d'exposition, elles peuvent provoquer des réactions *photochimiques*, *mécaniques* ou *thermiques* avec des conséquences pathologiques pour la peau et les différentes structures de l'oeil.

TITRE des FICHES

Fiche n° 1	ECLAIRAGE ET TRAVAIL
Fiche n° 2	LUMIERE
Fiche n° 3	OEIL ET VISION
Fiche n° 4	APTITUDES VISUELLES
Fiche n° 5	TYPES ET SYSTEMES D'ECLAIRAGE
Fiche n° 6	ECLAIRAGE QUANTITATIF
Fiche n° 7	ECLAIRAGE QUALITATIF
Fiche n° 8	EBLOUISSEMENT ET CONFORT VISUEL
Fiche n° 9	PLAINTES, TESTS ET REMEDES
Fiche n° 10	ECLAIRAGE DANS LES LOCAUX INDUSTRIELS
Fiche n° 11	ECLAIRAGE DES BUREAUX
Fiche n° 12	LAMPES ET LUMINAIRES
Fiche n° 13	FATIGUE VISUELLE
Fiche n° 14	EFFETS PHOTOBIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS OPTIQUES

A ces fiches s'ajoutent une bibliographie et un lexique.

ECLAIRAGE ET TRAVAIL

1. Ergonomie visuelle et éclairage

Un des objectifs importants de l'ergonomie est de prévenir un effort superflu et improductif en adaptant l'activité professionnelle au travailleur de sorte que ses capacités soient convenablement et efficacement utilisées [42]. Dans le contexte éclairage-vision, le but de l'*ergonomie visuelle* est d'*adapter l'environnement lumineux aux capacités visuelles de l'opérateur humain* et d'épargner un effort inutile au système visuel. Un éclairage inadéquat est un facteur de contrainte qui augmente la charge de travail ; l'opérateur doit faire un effort accru pour détecter et traiter l'information visuelle nécessaire à l'accomplissement de sa tâche. Ainsi, un faible *niveau d'éclairement* de la tâche, un rapport trop élevé entre la *luminance* de la tâche et celle de l'environnement proche, des *réflexions* diffuses qui estompent les détails, une luminance élevée proche de l'axe de vision qui provoque l'*éblouissement* constituent des facteurs supplémentaires de charge pour le système visuel. Une mauvaise distribution de la lumière peut également engendrer des *effets indirects*, tels que les postures inconfortables adoptées par les opérateurs pour éviter les *voiles des réflexions*. Une ambiance lumineuse inadéquate constitue donc une source de fatigue et d'inconfort visuel au travail avec des conséquences sur la sécurité, la santé et l'efficacité.

A partir de ce constat, il est possible de définir les *fonctions d'un bon éclairage* en termes de conditions nécessaires à une bonne visibilité et à l'exécution d'une tâche visuelle aisément et confortablement. Avant de spécifier ces conditions, il est utile de définir d'abord les notions de *tâche visuelle*, *visibilité*, *performance visuelle* et *confort visuel*, ensuite les facteurs qui influencent l'efficacité et le confort visuel de l'opérateur.

2. Tâche visuelle

Dans le langage commun, *voir* c'est percevoir l'image des objets de l'environnement par l'intermédiaire de l'oeil. Sur le plan psychophysiologique, *voir* c'est reconnaître l'objet et comprendre sa signification. Au poste de travail, *voir* signifie être capable d'utiliser les informations visuelles pour accomplir une tâche.

Le terme *tâche visuelle* désigne de façon conventionnelle, les objets et les détails qui doivent être vus pour exercer une certaine activité.

Observations

- Dans cette acception, le terme de *tâche visuelle* est erroné car il se réfère aux objets présentés visuellement (ou aux stimuli visuels) et non pas à la tâche qui consiste à extraire une information de ceux-ci [94]. Néanmoins, il est utilisé parce qu'il aide à comprendre les relations entre les conditions de présentation visuelle de la tâche et sa réception visuelle.
- Il convient également de distinguer la tâche visuelle de la tâche globale de l'opérateur. Ainsi, la tâche d'un contrôleur de qualité comporte la détection des défauts. Ceci implique plusieurs activités du système visuel, telles que l'exploration et l'examen de la tâche visuelle (caractère inadéquat, rayure, etc.), la perception d'une différence par rapport au normal. La tâche est accomplie lorsque l'opérateur effectue la correction, signale ou rejette l'objet qui comporte un défaut.

Implications pratiques

- Lorsqu'il s'agit d'aménager un *environnement lumineux*, il est nécessaire de décrire d'abord la *tâche visuelle* dans le cahier des charges. Cette description se réfère à la fois aux *objets* (ou détails) à distinguer et au *fond* sur lequel ils sont présentés. Ainsi, lorsqu'il s'agit d'une tâche de correction de texte sur papier, les caractères sombres sont imprimés sur fond clair ; dans la lecture des graduations sur une règle d'acier, les détails foncés se dessinent sur un fond clair...
- Ensuite, la tâche visuelle peut être spécifiée en termes de quantités mesurables (dimensions, couleur, mouvements dans le champ visuel, luminance de l'objet et du fond, contraste).

3. Visibilité et performance visuelle

Le terme **visibilité**¹ définit la qualité ou l'état d'un objet d'être perceptible par l'oeil. En fait, il s'agit d'une *zone de visibilité* dans laquelle un objet à peine vu est successivement détecté, discriminé, reconnu, identifié (AFE, 1993). Le terme visibilité est utilisé pour évaluer la facilité (ou la difficulté) avec laquelle le détail le plus fin - *détail critique* - d'une tâche visuelle peut être détecté et reconnu [24]. La visibilité du détail critique et, de façon plus générale, la performance dans une tâche visuelle dépendent des facteurs suivants [4] :

- *dimensions* du détail à distinguer ; elles sont utilisées pour calculer le quotient de sa dimension par la distance d'observation [7],
- *forme* du détail,
- *temps d'observation* disponible (*durée* de présentation du détail à percevoir),
- *luminance* du détail,
- *luminance d'adaptation*,
- *contraste* de luminance entre le détail et le fond,
- *contraste chromatique*,
- *état physiologique* de l'appareil visuel,
- *expérience* de l'observateur en rapport avec la tâche visuelle,
- *position* du détail dans le champ visuel,
- *expectative* temporelle et spatiale - anticipation du lieu et du moment d'apparition du détail dans le champ visuel.

Le terme **performance visuelle** est utilisé pour quantifier la *précision* et la *rapidité* d'exécution d'une tâche visuelle. En pratique, il s'agit de mesurer les capacités d'une personne à détecter, identifier et analyser les composantes visuelles de la tâche. Les performances visuelles sont influencées par des facteurs physiques, physiologiques et psychologiques :

- Les facteurs **physiques** influencent la visibilité de la tâche et le confort visuel. Ainsi, la *visibilité* dépend à la fois des caractéristiques de *la cible* (l'objet, le

détail) et de *l'environnement lumineux* (évoqués ci-dessus). Le **confort visuel** dépend surtout de *l'équilibre* des luminances dans le champ visuel.

- Les facteurs **physiologiques** incluent *les aptitudes visuelles* - acuité visuelle, sensibilité au contraste, fonctions oculomotrices... - et *l'état fonctionnel* de l'opérateur.
- Les facteurs **psychologiques** concernent la *perception* visuelle (forme, distance, profondeur, mouvements), *l'attention* (expectative, distraction, habitude) et la *motivation* de l'opérateur.

En pratique, l'exécution d'une tâche visuelle dépend à la fois des propriétés physiologiques de l'oeil et des *facteurs physiques indépendants de l'oeil* [50] dont les principaux sont :

- les dimensions du détail à distinguer,
- le contraste de luminance entre l'objet et le fond sur lequel il se détache,
- le niveau de luminance du fond,
- le temps utile pour voir.

Observations

- De façon générale, les mêmes facteurs qui influencent la visibilité influencent également la performance visuelle. Ceci s'explique par le fait que la visibilité a été quantifiée en mesurant la performance de détection des stimuli-test. A la suite de nombreuses recherches expérimentales, les *critères de visibilité* adoptés par la C.I.E. sont basés sur des mesures de performance visuelle dans des tâches où les variables principales étaient la *taille* angulaire d'un stimulus-test, le *niveau d'éclairement* et le rapport de *luminance* stimulus/fond [125 ; 13 ; 14 ; 15].
- Toutefois, le terme *visibilité* se réfère surtout à *la tâche* et plus particulièrement aux conditions d'éclairement - *niveau d'éclairement* et *contraste* de luminance - qui rendent visible le détail critique tandis que le terme *performance visuelle* ou performance perceptive se réfère surtout à *l'opérateur* et notamment à la précision et la rapidité d'exécution d'une tâche visuelle par un opérateur humain.
- Toutes conditions égales par ailleurs, la performance visuelle dépend de l'aptitude de la personne à accomplir la tâche (acuité visuelle, sensibilité au contraste, efficacité oculomotrice...) qui constitue la *performance potentielle* et de l'attitude et la motivation de la personne vis-a-vis de la tâche [7 ; 24]. En d'autres termes, la *performance réelle* ne dépend pas seulement de l'environnement physique ou des capacités individuelles, mais également de la volonté de l'opérateur de mobiliser ses ressources.

¹ Dans les ambiances extérieures, la visibilité est définie en termes de distance à laquelle un objet est à peine perçu. Dans les ambiances intérieures, la visibilité est définie en termes de contraste ou de taille d'un objet-test observé dans des conditions standardisées [94].

- En éclairagisme, le terme performance visuelle concerne *la visibilité de la tâche* et constitue un système de référence pour des recommandations du niveau et des rapports d'éclairage lors d'une installation d'un système d'éclairage.
- Pour toute autre utilisation (psychologie, ergonomie...), il convient de spécifier la tâche et les critères de mesure de la performance visuelle.

Ainsi, selon l'objectif poursuivi, diverses techniques sont utilisées pour tester certaines fonctions élémentaires du système visuel ou des activités perceptives qui les intègrent. Exemples : mesures *psychophysiques* de seuils des sensations visuelles, sensibilité au contraste, vitesse d'adaptation à l'obscurité... ; mesures *psychologiques* des réponses perceptives (précision et rapidité) dans des tâches de détection de signaux visuels, discrimination de formes, lecture, tâches industrielles, en laboratoire ou en situation réelle ; mesures *ophtalmologiques* d'acuité visuelle, de la vision des couleurs, du champ visuel, etc. lors des examens cliniques pour le dépistage des aptitudes visuelles exigées dans diverses professions ou de troubles fonctionnels ou organiques.

4. Confort visuel et satisfaction visuelle

Le terme **confort visuel**² se réfère à l'appréciation subjective d'un environnement qui permet de travailler aisément tout au long de la période de travail. Une bonne visibilité est une condition nécessaire mais pas suffisante pour effectuer des activités facilement et *confortablement*. En effet, tandis que la visibilité est conditionnée en premier lieu par le niveau d'éclairage et le contraste entre le détail et le fond, le confort visuel dépend de la qualité de l'éclairage et de la façon dont la lumière est distribuée sur toute les surfaces présentes dans le champ visuel de l'opérateur. L'uniformité relative de l'éclairage, l'équilibre des luminances, les caractéristiques photométriques des surfaces (finition adéquate du plafond, des murs, du sol et de l'équipement) ainsi que

² En éclairagisme, différents indices (*Probabilité du Confort Visuel, Indice d'Eblouissement*) ont été élaborés pour évaluer le confort visuel en termes de gêne provoquée par l'éblouissement direct (voir fiche n° 8).

la suppression des réflexions indésirables contribuent au confort visuel.

Le terme **satisfaction visuelle** est utilisé pour décrire l'acceptabilité de l'environnement lumineux réel par l'utilisateur. Pour les ambiances intérieures, la satisfaction visuelle de l'opérateur dépend des conditions qui lui permettent de travailler facilement et du caractère agréable de l'environnement lumineux à la fois lorsqu'il est concentré sur la tâche, et lorsqu'il regarde ailleurs pour se relaxer.

La satisfaction visuelle dépend à la fois de l'environnement lumineux et des préférences individuelles. Ainsi, lorsque les surfaces de l'intérieur et de la tâche sont mates, la satisfaction visuelle est influencée par l'éclairage des surfaces, la composition des couleurs, les réflexions et les luminances des sources lumineuses. Pour des surfaces de l'intérieur et des tâches brillantes, la satisfaction visuelle est influencée négativement par des luminances qui peuvent voiler la tâche et diminuer la visibilité ; des luminances excessives peuvent provoquer l'éblouissement.

Observations

Les facteurs qui diminuent le confort visuel (réflexions parasites, éblouissement...) affectent également la satisfaction visuelle. Toutefois, celle-ci est déterminée surtout par les *préférences* individuelles. En effet, un environnement lumineux peut être préféré même s'il n'est pas toujours confortable (éclairage naturel, par exemple).

5. Environnement lumineux et visibilité

Les facteurs de l'environnement lumineux qui influencent la visibilité de la tâche sont l'éclairage et le contraste des luminances, ceux qui contribuent au confort visuel concernent surtout l'équilibre des luminances dans le champ visuel, l'absence d'éblouissement et l'absence de réflexions de voile (voir fiches n° 6, 7, 8).

L'**éclairage**³ (voir fiches n° 2 et 6) concerne à la fois la zone de *travail* et les zones de *déplacement* ou de mouvement. La visibilité d'une tâche augmente avec son niveau d'éclairage. Cet effet est d'autant

³ L'*éclairage* rend compte de la quantité de lumière reçue par une surface.

plus important que le détail est plus petit et les exigences oculo-motrices plus grandes. Ainsi, une augmentation du niveau de l'éclairage entre certaines limites (de 200 à 2000 lux) améliore la visibilité, la vitesse et la précision d'exécution d'une tâche visuelle. Un éclairage *horizontal* du plan de travail est généralement suffisant pour les bureaux ou les ateliers d'électroniques, lorsqu'il existe peu d'obstacles à l'éclairage et un coefficient de réflexion des surfaces élevé. Toutefois, si les tâches prédominantes s'effectuent dans un plan *vertical*, comme dans les entrepôts, ou lorsqu'un obstacle perturbe l'éclairage, il convient de prévoir un éclairage orienté de façon à mettre en évidence les signaux pertinents.

La **luminance**⁴ constitue le facteur d'éclairage le plus important pour la visibilité de la tâche. Elle concerne à la fois la tâche et son environnement et plus particulièrement le **contraste** entre les luminances de l'objet (le détail à percevoir) et le fond sur lequel il se détache (voir fiches n° 2 et 7). Lorsque la luminance d'une partie du champ visuel est plus élevée que la luminance moyenne à laquelle le système visuel est adapté, l'excès de lumière peut provoquer un *éblouissement* (voir fiches n° 3 et 8) qui constitue à la fois un facteur de risque pour la sécurité et qui peut également diminuer l'efficacité de l'opérateur.

La **couleur** d'une surface dépend à la fois de ses caractéristiques de réflexion (coefficient de réflexion spectrale) et de la composition spectrale de la lumière qui l'éclaire (voir fiche n° 7). En effet, un objet n'apparaît pas de la même couleur lorsqu'il est éclairé par le soleil ou par des lampes à vapeur de mercure. Or, dans certaines activités (montages électriques, par

exemple), la discrimination des couleurs est importante pour la sécurité. Ainsi, sous un éclairage monochromatique, comme la lumière jaune fournie par les lampes à décharge de sodium à basse pression, la perception des couleurs est très différente de celle en lumière naturelle. De même, lorsque la luminance est très faible, la vision des couleurs diminue et toutes les couleurs sont perçues comme des nuances de gris.

6. Capacités visuelles

Les capacités visuelles telles que l'*acuité visuelle*, la vision des *couleurs*, la vision du *relief*, le *champ visuel* etc. diffèrent d'un individu à l'autre et présentent des variations chez une même personne selon l'âge, l'état de santé, le niveau de vigilance, la fatigue, les rythmes biologiques (voir fiches n° 3, 4 et 13). Dans un environnement de travail donné et pour une personne donnée, certains objets sont facilement et rapidement visibles, d'autres exigent un effort important pour être vus, d'autres restent invisibles. Toutes conditions égales par ailleurs, l'exécution d'une tâche visuelle dépend surtout de la capacité de l'oeil à localiser l'objet dans le champ visuel, à distinguer les différences de luminance entre l'objet et fond et à percevoir les détails fins des objets. Des *aptitudes visuelles* élevées sont particulièrement exigées dans certaines professions. Ainsi, les travaux dangereux, les fonctions de sécurité, les travaux de précision requièrent une bonne acuité visuelle de loin et de près, des qualités stéréoscopiques, un bon équilibre musculaire et des capacités de discrimination chromatiques (voir fiche n° 4).

⁴ La *luminance* rend compte de l'intensité du flux lumineux qui parvient aux yeux de l'opérateur.

LUMIERE

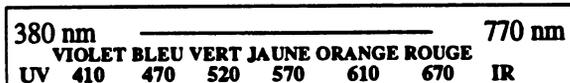
La lumière est à la fois une entité physique, physiologique et psychologique ; *physique*, parce que la lumière est une forme d'énergie - l'énergie radiante, *physiologique*, parce qu'elle est le stimulus spécifique des récepteurs visuels et *psychologique*, parce qu'elle donne naissance aux impressions subjectives de lumière.

La lumière est l'énergie radiante capable d'exciter la rétine et de produire une sensation visuelle.

Pour l'organisme humain, la lumière remplit deux catégories de fonctions photobiologiques, l'une spécifique, visuelle, l'autre non spécifique, neuroendocrine. La première fournit l'information visuelle sur l'environnement, la deuxième modifie l'activité métabolique et les rythmes biologiques (voir fiche n° 14).

1. Nature de la lumière

La lumière constitue une partie infime du large spectre des rayonnements *électromagnétiques*. Distribuées selon leur longueur d'onde ou leur fréquence, les radiations électromagnétiques s'étendent des rayons cosmiques aux ondes hertziennes (figure 2.1). La lumière est la partie du spectre à laquelle les récepteurs visuels sont sensibles : le *spectre visible*. Les rayonnements lumineux occupent un intervalle de longueurs d'onde de $380.10^{-9}m$ à $770.10^{-9}m$ (de 380 à 770 nanomètres¹).



La lumière se propage sous forme d'ondes, en ligne droite à environ $300.000 \text{ km.s}^{-1}$ dans le vide. Lorsqu'elle traverse un milieu transparent, cette vitesse diminue en fonction de l'indice de réfraction de ce milieu. Selon la théorie corpusculaire,

¹ Un nanomètre (nm) = 10^{-9} m.

l'énergie radiante est émise et absorbée sous forme de quanta d'énergie - les *photons* - qui activent les récepteurs rétiniens et donnent naissance aux sensations de lumière [94].

La lumière blanche correspond à une répartition de l'énergie lumineuse sur l'ensemble des longueurs d'onde du spectre visible. Lorsqu'une lumière blanche traverse un prisme, elle est décomposée en ses longueurs d'ondes constitutives ; elles correspondent aux différentes *sensations de couleurs* (figure 2.2). La gamme de longueur d'ondes à laquelle l'oeil est sensible s'étend du violet jusqu'au rouge. Les longueurs d'onde plus courtes (*ultraviolets*) ou plus longues (*infrarouge*) sont invisibles. L'oeil humain constitue un capteur de lumière "passe bande" qui associe une sensation de couleur² allant du violet au rouge à chaque longueur d'onde de cet intervalle.

Pour une même intensité lumineuse, la sensibilité de l'oeil varie en fonction de la longueur de l'onde du rayon lumineux (voir fiche n° 3).

2. Sources de lumière

La principale source³ de lumière naturelle est la lumière solaire. Les sources de lumière artificielle adaptées à l'éclairage intérieur sont les lampes à incandescence, fluorescentes et à décharge (voir fiche n° 12). Les avantages et les inconvénients de l'éclairage naturel et de différentes catégories d'éclairage artificiel sont présentés dans la fiche n° 5.

3. Grandeurs photométriques et unités de mesure

Il existe deux catégories d'unités de mesure pour déterminer les différentes

² La couleur se réfère à la fois à l'objet coloré, à la couleur de la source de lumière - qui dépend du spectre émis par cette source - et au rendu de couleur (voir fiche n° 7).

³ En photométrie, le terme source se réfère non seulement aux sources primaires (naturelles ou artificielles) de lumière, mais aussi aux surfaces transmettant ou réfléchissant la lumière (murs, dessus des tables, objets éclairés).

caractéristiques de la lumière : radiométriques et photométriques. Les grandeurs *radiométriques* ou énergétiques permettent de décrire les caractéristiques physiques des radiations (longueur d'onde, vitesse, fréquence...). Les grandeurs *photométriques* (flux lumineux, éclairement, luminance...) sont utilisées pour déterminer les caractéristiques des rayonnements lumineux en relation avec la sensation visuelle qu'ils provoquent.

Les principales unités utilisées pour mesurer la lumière sont le *lux* - unité de mesure de l'éclairement - et la *candéla* - unité d'intensité lumineuse d'une source (figure 2.3 et tableau 2.3).

L'éclairement (E) se réfère à la quantité de lumière reçue par une surface ou la densité du *flux lumineux*⁴ tombant sur une surface. L'unité de l'éclairement est le *lux* (lx) : il définit l'éclairement d'une surface d'un m² recevant un flux lumineux d'un lumen (lm) : 1 lux = 1 lm.m⁻².

En pratique, l'éclairement est mesuré dans un plan *horizontal* (table de travail, par exemple) ou *vertical* (rayons de bibliothèque, pièces stockées sur étagères, écran de visualisation). Pour des sources ponctuelles, l'éclairement est directement proportionnel à l'intensité lumineuse de la source et inversement proportionnel au carré de la distance entre la source lumineuse et l'objet éclairé (figure 2.4).

L'oeil humain répond à des niveaux d'éclairement très variés, de quelques lux, dans une pièce obscure à 100 000 lux sous le soleil à midi. A l'extérieur, les niveaux peuvent varier entre 2 000 et 100 000 lux le jour ; l'éclairage artificiel extérieur de nuit varie entre 50 et 500 lux. (Voir tableau 2.1).

⁴ Le *flux lumineux* (F) définit la capacité d'une source à produire une sensation lumineuse (figure 2.3). Unité : **lumen (lm)**. Le flux lumineux est une grandeur dérivée du *flux énergétique* (Fe) qui est la puissance émise, transportée ou reçue sous forme de rayonnement. Unité : **watt (W)**. Le flux lumineux se réfère à la puissance lumineuse d'une source rapportée à la sensibilité spectrale de l'oeil. La notion de flux lumineux est utilisée, entre autres, pour calculer l'efficacité lumineuse d'une source de lumière.

Plein soleil, à midi	100 000 lx
Temps nuageux	2 000 à 10 000 lx
Pleine lune	0,25 lx
Bureau	400 à 600 lx
Habitation	150 à 300 lx
Rue éclairée	20 à 50 lx

Tableau 2.1

Observations

Les capacités visuelles et le confort visuel ne sont pas affectés par le flux lumineux qui frappe la surface de travail, mais par la lumière qui parvient aux yeux de l'opérateur par l'intermédiaire de la zone ou de l'objet éclairé ; cette lumière correspond à la *luminance*.

La *luminance (L)* se réfère à l'intensité lumineuse d'un point d'une surface donnée et dans une *direction donnée* (figure 2.3). Elle peut provenir *directement* d'une source lumineuse (lampe) ou *réfléchi*e par une surface éclairée (murs, meubles, d'autres objets). L'unité de mesure de la luminance est la **candela par m² (cd.m⁻²)**.

Le tableau 2.2 donne quelques valeurs de luminances dans les bureaux avec un éclairage de 300 lx

Lampe fluorescente (65 W)	10 000 cd.m ⁻²
Surface des fenêtres	1 000 - 4 000 cd.m ⁻²
Papier blanc sur une table	70 - 80 cd.m ⁻²
Surface de la table	40 - 60 cd.m ⁻²
Cadre de l'écran (brillant)	70 cd.m ⁻²
Cadre de l'écran (noir, mat)	4 cd.m ⁻²
Fond de l'écran	5 - 15 cd.m ⁻²

Tableau 2.2

Observations

- La luminance rend compte de l'intensité du flux lumineux provenant d'un objet ou d'une surface et se traduit subjectivement par la perception de *luminosité* ou de *brillance*.
- La perception de la luminosité d'un objet ou de la brillance d'une surface dépend de la luminance de l'objet et de l'état d'adaptation de l'oeil.
- Les mesures d'éclairement (en lux) quantifient uniquement la quantité de lumière reçue par unité de surface. La lumière qui tombe sur une surface n'est vue qu'après réflexion ; l'oeil humain ne perçoit généralement que la lumière réfléchi. L'impression visuelle ne dépend donc pas uniquement de la quantité de lumière produite mais également des propriétés de *réflexion* des surfaces.

La *réflexion* constitue la propriété d'une surface qui lui permet de renvoyer une partie ou la totalité de la lumière qui l'éclaire. Des surfaces polies ou brillantes

peuvent rendre une image exacte de la source lumineuse ou des objets, comme l'image réfléchiée par un miroir. Cette forme de réflexion est dite réflexion directe ou *réflexion spéculaire* ; si la surface est entièrement mate, la lumière réfléchiée est diffusée et la *réflexion* est qualifiée de *diffuse* ; si la surface est rugueuse, la *réflexion* est *dispersée* (figure 2.5).

Le *facteur de réflexion (réflectance)* (ρ) est le rapport entre la lumière réfléchiée et la lumière incidente. Le facteur de réflexion constitue une mesure globale de la lumière réfléchiée par une surface. Toutefois, en pratique, la partie la plus importante est celle qui se trouve dans le champ visuel de l'observateur. En effet, la luminance d'une surface mate apparaît uniforme indépendamment de la direction du regard. En revanche, une surface très brillante peut apparaître sans éclat lorsqu'elle est regardée

sous certains angles. Ces variables peuvent influencer l'évaluation subjective de l'éblouissement (voir fiche n° 8).

Observations

- La luminance d'une surface *mate* est directement proportionnelle au produit de l'éclairement de la surface et son facteur de réflexion.
- La luminance d'une surface régulière *réfléchissante* est proportionnelle au produit de son facteur de réflexion par la luminance de l'environnement dans la direction des réflexions considérées.
- En pratique, la plupart des surfaces ont des propriétés de réflexion mixtes ; leur luminance dépend donc à la fois de l'éclairement de la surface et de la luminance de l'environnement.
- Lorsque la zone est mate et réfléchit de manière diffuse la lumière dans toutes les directions, la luminance ne varie pas en fonction de la position de l'observateur.

Grandeurs	Symbole	Unités	Signification	Utilisation	Exemples
Flux lumineux	F ou Φ	lumen (lm)	Puissance lumineuse d'une source rapportée à la sensibilité de l'oeil	Déterminer l'efficacité lumineuse d'une source	- Lampe à incandescence 60 W : 740 lm - Lampe à fluorescence 36 W : 2 500 - 3 450 lm - Lampe sodium haute pression: 400 W 48 000 lm - Lampe à halogénures 2000 W = 200 000 lm
Intensité lumineuse	I	candéla (cd)	Puissance lumineuse d'une source dans une direction donnée	Déterminer l'intensité lumineuse d'un flux orienté	- Réflecteur industriel à 2 lampes 36 W de 3 000 lm : 1320 cd - Projecteur lampe incandescente halogène : 15 000 cd - Projecteur lampe à halogénure 2 000 W : de 400 000 à 2 500 000 cd
Eclairement	E	lux (lx)	Flux lumineux reçu par une surface	Déterminer la quantité de lumière reçue par une surface	- Plein soleil : jusqu'à 100 000 lux - Près d'une fenêtre par temps couvert : 1 000 à 3 000 lux - Pleine lune, ciel clair : 0,25 lux
Luminance	L	candéla par m ² (cd.m ⁻²)	Intensité lumineuse d'une surface dans une direction donnée	Déterminer l'intensité lumineuse reçue par l'oeil	- Pleine lune : 2 500 cd.m ⁻² - Lampe fluorescente 36 W blanc chaud : 11 000 cd.m ⁻² - Filement lampe à incandescence 300 W : 8 000 000 cd.m ⁻² - Soleil : 1 600 000 000 cd.m ⁻² - Feuille papier blanc éclairée à 1 000 lux : 250 cd.m ⁻² - Chaussée de route éclairée : 1 à 2 cd.m ⁻²

Tableau 2.3 : Grandeurs photométriques et unités de mesure

4. Méthodes photométriques de mesurage

Les méthodes photométriques mesurent la lumière en relation avec la sensibilité de l'oeil. Les *photomètres* sont des instruments qui mesurent l'énergie radiante du spectre visible. Ils permettent de mesurer l'intensité lumineuse, le flux lumineux, le niveau d'éclairement, la luminance, le facteur de réflexion, le facteur de transmission, la couleur, la distribution

spectrale et la visibilité. Sur le terrain, les principales mesures effectuées par les ergonomes concernent l'*éclairement* et la *luminance*. Dans certaines situations, il est utile de mesurer la *visibilité* [94 ; 25].

4.1. Mesurage de l'éclairement

La quantité de lumière reçue par une surface est mesurée au moyen d'un *luxmètre*, composé d'une cellule photosensible qui transforme l'énergie lumineuse en énergie

électrique. Un filtre placé entre la source et la cellule corrige la courbe de réponse de l'appareil par la sensibilité spectrale de l'oeil d'un observateur de référence. Un correcteur d'incidence permet de prendre en compte tous les rayons lumineux quelle que soit leur angle d'incidence. L'instrument est directement gradué en *lux*.

4.2. Mesurage de la luminance

La quantité de lumière émise par une source ou une surface qui réfléchit la lumière est mesurée avec un *luminancemètre*. Construit sur le même principe que le luxmètre, le luminancemètre est constitué d'une cellule photosensible et d'un filtre montés derrière un dispositif de visée ; celui-ci permet de focaliser les rayons issus uniquement de la source considérée sous un angle de 1°. L'instrument est directement gradué en cd.m^{-2} .

Observations

Les mesures courantes de lumière permettent de connaître, avec une grande précision, la quantité de lumière émise ou reçue. En revanche, la dose de lumière reçue en fonction du *temps* d'exposition n'est pas prise en compte. Il existe cependant des procédés pour mesurer, en situations expérimentales, les effets des rayonnements UV, mais ils ne sont pas disponibles pour des applications ergonomiques.

4.3. Mesurage de la visibilité

Dans le cas d'un petit disque clair sur un fond sombre, la visibilité peut être définie en termes de contraste : $C = L_o - L / L$, où C est le contraste, L_o est la luminance du détail et L est la luminance du fond. La luminance du détail peut être réduite jusqu'à le rendre à peine visible (seuil)⁵; l'ampleur de la réduction du

contraste nécessaire pour amener le détail au seuil de contraste est considérée comme une mesure de la difficulté de la tâche en termes de visibilité. En effet, une visibilité "élevée" de la tâche nécessite une réduction massive du contraste pour atteindre le seuil, une "faible" visibilité nécessite une faible diminution du contraste.

En pratique, le contraste du détail dans la tâche réelle est comparée avec celui d'une tâche standard. Ce contraste de référence est appelé *contraste équivalent*.

La visibilité d'un objet peut être également mesurée en termes de taille minimale à percevoir (acuité visuelle). La visibilité d'un détail s'exprime alors par le rapport entre la taille d'un objet et la taille du plus petit objet qu'un observateur puisse voir dans des conditions similaires. Lorsque ce rapport est inférieur à 1, l'objet est invisible. Pour une visibilité aisée, ce rapport doit être de 2,5 au minimum. Lorsque le rapport se situe entre 1 et 2,5 un effort mental plus ou moins important est nécessaire pour voir et reconnaître l'objet ; avec le temps de travail, la fatigue mentale s'installe progressivement. L'opérateur tend également à réduire la distance de vision et ceci augmente l'effort des muscles de l'oeil sollicités au cours de l'accommodation. A la fatigue mentale s'ajoute une fatigue musculaire [42].

Pour quantifier la visibilité la CIE fait appel au concept de "niveau de visibilité"⁶ et à la fonction de "visibilité de référence"⁷ [4].

⁵ A ce niveau, le contraste est appelé *seuil de contraste* (SC). La visibilité (V) = C/SC , où C = contraste et SC seuil de contraste [94].

⁶ Le niveau de visibilité (*visibility level -VL*) est un multiplicateur de contraste qui s'applique à la fonction de visibilité de référence afin de fournir le contraste de luminance nécessaire aux différents niveaux de luminance du fond de la tâche.

⁷ La fonction de visibilité de référence (*visibility reference function-VL1*) représente le contraste de luminance nécessaire aux différents niveaux de luminance de fond de la tâche pour atteindre le seuil de la tâche de visibilité de référence (qui consiste en un disque de 4 mm de diamètre exposé pendant 1/5 s.

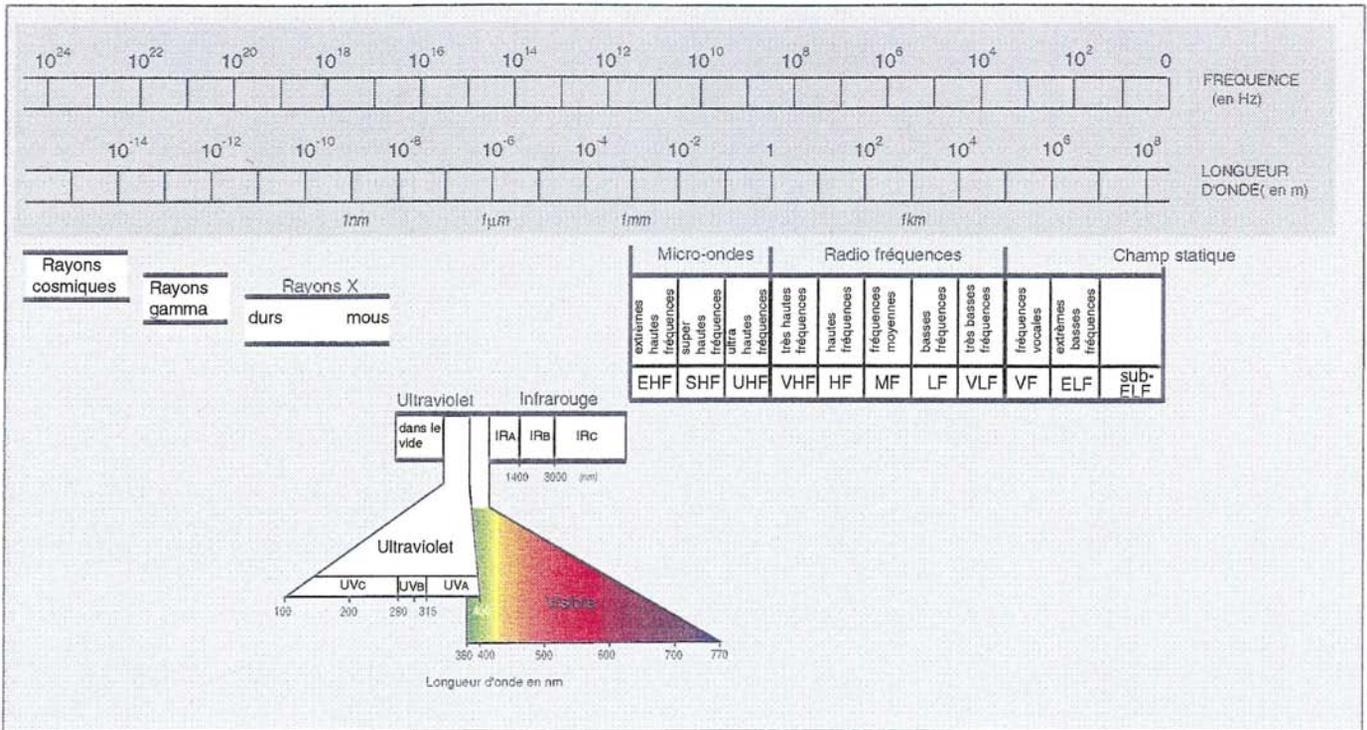


Figure 2.1. Spectre électromagnétique (d'après [94])

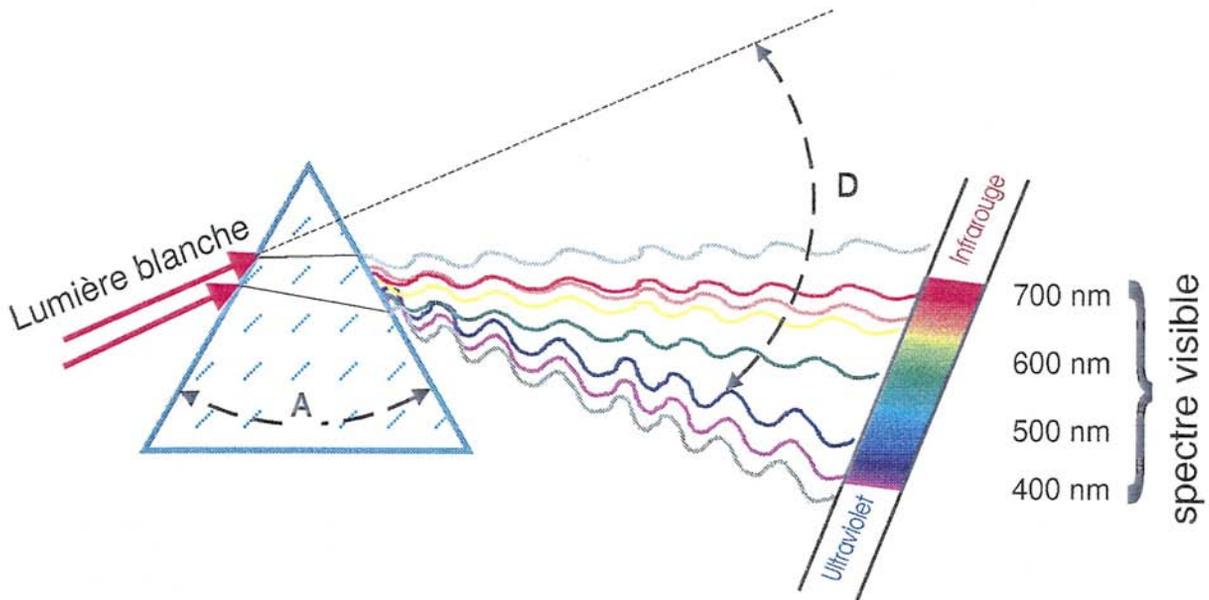


Figure 2.2. Composition spectrale d'une lumière blanche traversant un prisme

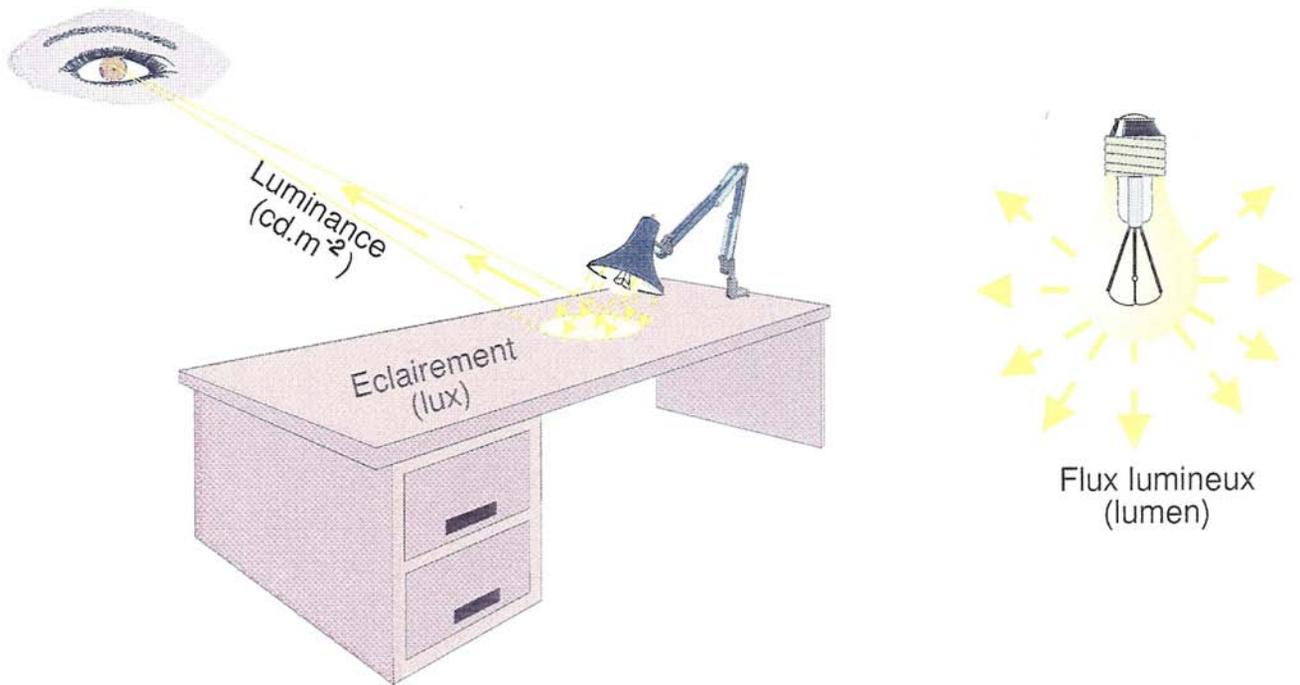


Figure 2.3. Eclairage, luminance, flux lumineux

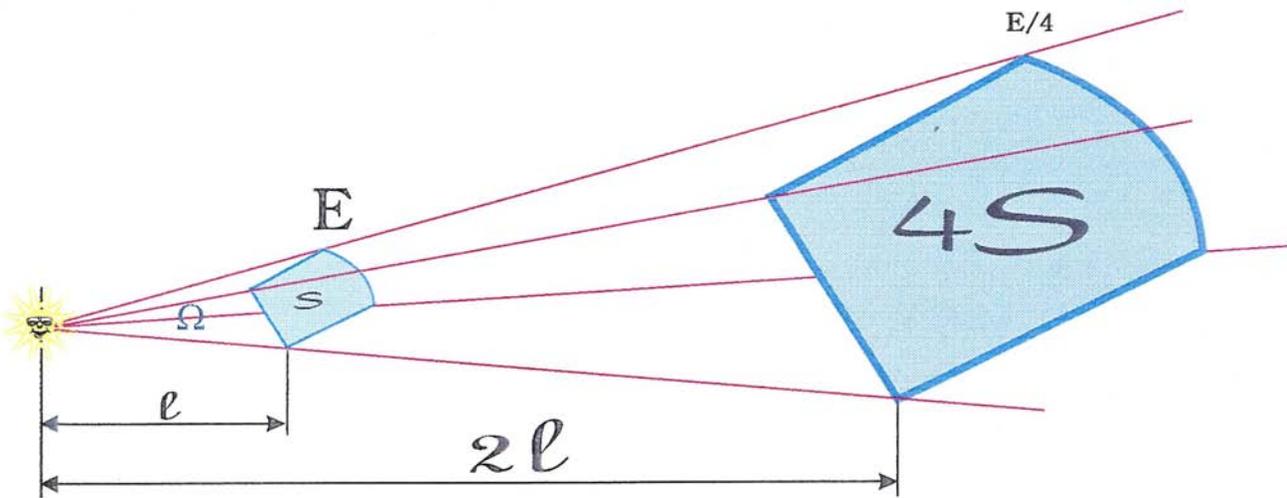


Figure 2.4. Illustration de la loi de l'inverse du carré de la distance d'après [94]

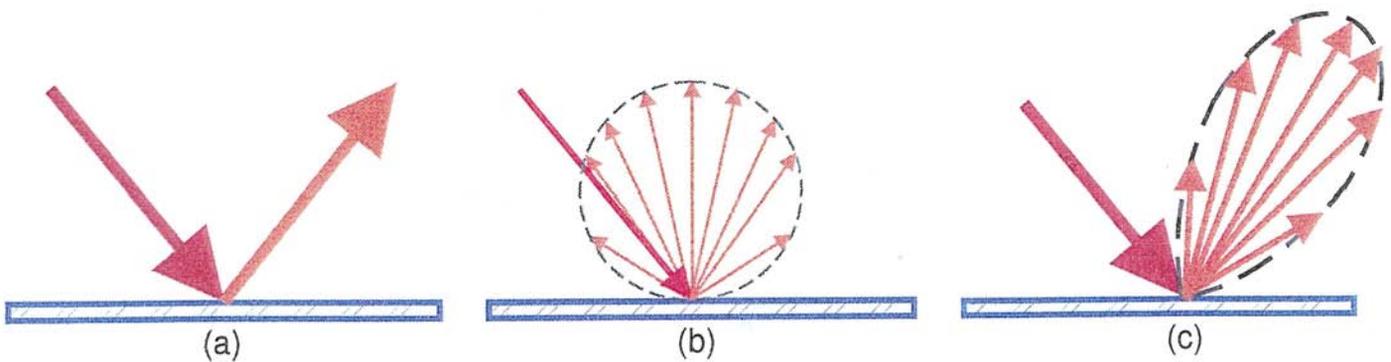


Figure 2.5. Réflexions (d'après [94]) : (a) Surface polie - réflexion spéculaire

(c) Surface rugueuse - réflexion dispersée.

(c) Surface rugueuse - réflexion dispersée.

Voir c'est explorer du regard son environnement. C'est y reconnaître et y localiser formes, objets inanimés, êtres vivants. C'est aussi pouvoir apprécier leurs déplacements et se mouvoir par rapport à eux.

M. Jannerod

1. L'oeil dans le système visuel

La perception des scènes et des objets du monde extérieur est un processus psychophysiologique auquel participent l'oeil, les relais intermédiaires du système nerveux et le cerveau. Dans ce processus, l'oeil assure à la fois la formation d'une image détaillée des objets de l'environnement sur la rétine et la réception des stimuli visuels. Les cellules photosensibles convertissent la lumière en potentiels d'action¹ qui sont acheminés ensuite jusqu'au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique (figures 3.1 et 3.2). Au niveau cérébral, l'information visuelle est traitée en relation avec d'autres informations présentes ou stockées en mémoire. L'oeil est également un dispositif mobile, capable d'explorer l'espace visuel, de localiser une cible et de poursuivre ses déplacements dans le champ visuel.

Dans le système visuel, l'oeil remplit trois fonctions contrôlées et coordonnées par le système nerveux. L'oeil est un *capteur* de lumière, un transformateur de l'énergie lumineuse en activité neuronale ; il est également un instrument d'*optique* comportant une lentille dont la focale peut varier et qui focalise ainsi l'image selon la proximité ou l'éloignement de l'objet et un diaphragme qui limite la quantité de lumière

¹ Un *potentiel d'action* est l'inversion transitoire brève du potentiel transmembranaire d'un neurone (cellule nerveuse). Le potentiel d'action peut être considéré comme le codage binaire de l'information traitée par le système nerveux. L'information est codée par les récepteurs sous forme de trains de potentiels d'action modulés en fréquence.

qui pénètre dans l'oeil ; il est enfin un dispositif d'*exploration* de l'environnement qui assure le lien entre l'objet en mouvement ou le détail visé et la zone d'acuité visuelle maximale.

2. Structure de l'oeil

Le globe oculaire (figure 3.3) présente de l'extérieur vers l'intérieur, trois tuniques : la sclérotique, la choroïde et la rétine.

- La paroi extérieure - la *sclérotique* - est constituée de bandes fibreuses sur lesquelles s'insèrent les muscles extérieurs responsables des mouvements oculaires. Elle assure la forme de l'oeil et la protection des éléments sensoriels. La partie avancée de cette enveloppe protectrice est transparente : c'est la *cornée*, assimilable à une lentille convergente.
- La couche moyenne - la *choroïde* - est une membrane vasculaire qui assure l'irrigation sanguine de l'oeil. Elle se prolonge en avant par les *corps ciliaires*² auxquels est amarrée une lentille biconvexe : le *crystallin*, et l'*iris*, véritable diaphragme musculaire. Le cristallin sépare la chambre antérieure qui contient l'*humeur aqueuse* et la chambre postérieure qui contient le *corps vitré*. L'humeur aqueuse et le corps vitré participent au maintien de la forme du globe oculaire et assurent la nutrition des structures non vascularisées de l'oeil.
- La tunique interne - la *rétine* - est la membrane sensorielle de l'oeil. Elle est constituée de plusieurs couches de cellules et en particulier les

² Le corps ciliaire comprend trois parties : l'anneau ciliaire, le procès ciliaire et le *muscle ciliaire*, constitué des fibres radiales et circulaires.

photorécepteurs: les cônes et les bâtonnets. La région de la rétine correspondant au pôle postérieur de l'oeil, située à proximité de l'axe optique, forme une petite dépression (1,5 mm de diamètre) appelée *fovéa*. Elle constitue l'aire de la vision centrale où la capacité de l'oeil à distinguer les détails est maximale. Le point de départ du nerf optique dans l'oeil est insensible à la lumière (*tache aveugle*).

Les principales fonctions - optique, sensorielle et motrice - sont examinées dans ce qui suit.

3. Fonctions optiques

Un objet peut être conçu comme une configuration de points dont chacun envoie des rayons de lumière qui traversent les milieux réfringents de l'oeil (cornée, cristallin et humeurs intraoculaires) et projettent l'image de cet objet sur la rétine. Si l'appareil optique ne focalise pas chaque rayon sur la rétine, l'image de l'objet n'est plus un point mais une tâche de lumière. A la mise au foyer optique de cette image contribue d'abord la **cornée**, lentille à courbure fixe qui confère à l'oeil 70 % de sa puissance de réfraction. Ensuite, le **cristallin**, dont la courbure varie en fonction de la tension mécanique exercée par les corps ciliaires, ajuste le pouvoir de réfraction de l'oeil selon la distance de l'objet et focalise l'image sur la rétine.

3.1. Accommodation.

L'*accommodation* est la *capacité de l'oeil à focaliser l'image d'un objet situé à différentes distances*. Sans accommodation, l'image d'un objet qui se rapproche serait projetée derrière la rétine; l'image serait donc plus ou moins floue. Cette image trouble déclenche, par un mécanisme réflexe, la contraction des fibres musculaires contenus dans les corps ciliaires ; la capsule qui maintient le cristallin se relâche et le cristallin, grâce à son élasticité, devient plus sphérique³. Dans la vision de près, l'accommodation comporte une augmentation de la courbure du cristallin (surtout de sa surface

antérieure) et donc de sa puissance de réfraction : l'image est alors focalisée sur la rétine (figure 3.4).

Chez les personnes âgées, l'élasticité du cristallin diminue et il est de moins en moins capable de modifier sa courbure (voir fiche n° 4) ; l'image des objets proches se forme derrière la rétine, c'est la *presbyopie* (ou presbytie). Dans ces conditions, la vision au loin est conservée mais pour la vision de près (lecture) il est nécessaire de porter des verres correcteurs biconvexes.

L'*accommodation* est un acte complexe qui comporte, outre l'augmentation de la convexité du cristallin, la rotation interne des yeux (*vergence*) qui assure la fusion, au niveau du cortex visuel, des images rétinienne issues de chaque oeil et la diminution du diamètre de la pupille (*myosis*) qui augmente la profondeur du champ et la netteté de l'image (voir § 4.5). Ainsi, dans la vision de près, la focalisation de l'image sur la rétine résulte de l'activité synergique de trois composantes fonctionnelles, l'*accommodation* du cristallin, la *convergence* des axes visuels et le *myosis*.

Observations

- La capacité d'accommodation peut être mesurée en déterminant le point le plus rapproché qui peut être vu nettement - le *Punctum Proximum d'Accommodation* (PPA) ; il constitue la distance minimale de vision nette ($\approx 12\text{cm}$). Le PPA constitue une mesure de la force du muscle ciliaire et de l'élasticité du cristallin. Il recule avec l'âge (voir fiche n° 4). Le *Punctum Remotum* (PR) - est théoriquement situé à l'infini mais il peut se rapprocher lorsque l'oeil n'est pas parfait ou en fonction de facteurs externes.
- Il est vrai qu'une focalisation à l'infini "repose les yeux" (relaxe les muscles ciliaires), mais il n'est pas vrai que "lorsque les yeux sont au repos, ils focalisent à l'infini" [92]. En effet, dans l'obscurité complète, les yeux sont focalisés à une distance d'environ 660 à 760 mm [62]. Le rapprochement du point de focalisation dans l'obscurité constitue un signe de fatigue visuelle (voir fiche n° 13).
- Lorsque le niveau d'éclairement est faible, l'amplitude de l'accommodation diminue : le PR se rapproche et le PPA recule. Ce phénomène est appelé *presbytie nocturne*. De même, la vitesse et la précision de l'accommodation diminuent avec la réduction du contraste de luminance et la netteté du texte imprimé.

³ "la lentille de l'oeil se comporte comme une balle en mousse qui se détend après avoir été comprimée" [71].

- La mise au point des objets situés à proximité (au cours de la lecture, par exemple) nécessite la contraction continue des muscles ciliaires. Plus l'objet est proche, plus grande est la tension des corps ciliaires pour focaliser et pour maintenir l'image nette de l'objet sur la rétine [92]. A la suite d'une sollicitation prolongée de la vision de près, le punctum proximum recule ; les valeurs du PPA augmentent. Le recul du PPA constitue, donc un signe de *fatigue visuelle* (voir fiche n° 13).

3.2. Erreurs de réfraction

Des images indistinctes ou troubles peuvent être dues à des *erreurs de réfraction* non corrigées (figure 3.5) ; il s'agit de :

- *la myopie* : l'image est focalisée devant la rétine. Le myope voit mal de loin et bien de près ; la correction est assurée par le port de verres *concaves*.
- *l'hypermétropie* : l'image est focalisée derrière la rétine. L'hypermétrope voit mal de près ; la correction est assurée par le port de verres *convexes*.
- *l'astigmatisme* : les points de l'objet sont focalisés dans des plans différents à cause des indices de réfraction différents dans les différents méridiens de l'oeil.
- *la presbyopie* : les objets proches sont focalisés derrière la rétine à cause d'une perte de la capacité accommodative avec l'âge ; les personnes presbytes doivent accommoder même en vision de loin.

4. Fonctions sensorielles

Les capteurs de lumière, les **photorécepteurs**, situés dans la profondeur de la rétine, transforment, par réaction photochimique, l'énergie rayonnante en activité neuronale qui se propage sous forme de potentiels d'action jusqu'aux aires visuelles du cortex cérébral.

4.1. Récepteurs photosensibles

L'oeil humain contient deux types de photorécepteurs, les *cônes*, qui assurent la détection des détails et la vision des couleurs dans une ambiance bien éclairée et les *bâtonnets*, qui permettent la vision (en noir et blanc) dans un environnement faiblement éclairé (figure 3.6). Ainsi, les *cônes* et les *bâtonnets* constituent deux systèmes fonctionnels, les premiers pour la vision diurne (*vision photopique*) et la

vision nocturne (*vision scotopique*) et la vision périphérique. Les différences entre ces deux systèmes fonctionnels s'expliquent à la fois par la structure, le nombre, la topographie, et les connexions nerveuses respectives des *cônes* et des *bâtonnets* [98].

Observations

- La *fovéa* (zone centrale de la rétine) ne comporte que des *cônes* (1 million/1,75 mm²). Les autres zones de la rétine comportent à la fois des *cônes* et des *bâtonnets*. La densité des *cônes* décroît du centre vers la périphérie de la rétine.
- Les *bâtonnets* (environ 120 millions) sont 20 fois plus nombreux que les *cônes* (environ 6 millions), le nombre des fibres optiques est d'environ 800 000. La densité des *bâtonnets* augmente du centre vers la périphérie de la rétine.
- Dans la région fovéale, chaque *cône* transmet le message nerveux à *une seule* cellule bipolaire puis à une seule cellule ganglionnaire dont l'axone entre dans la constitution du nerf optique. De cette façon, le cerveau est informé "point par point" de l'intensité lumineuse captée par chaque photorécepteur. En revanche, la sensibilité des *cônes* à la lumière est faible.
- Détecteurs de lumière par excellence, les *bâtonnets* captent les rayonnements lumineux de faible intensité et les transforment en signaux électriques. Dans la région périfovéale et surtout, dans la périphérie de la rétine, plusieurs *bâtonnets* sont connectés à une même cellule ganglionnaire ; une lumière de faible intensité stimule alors un grand nombre de *bâtonnets* et, partant, active plus intensément la voie visuelle par sommation spatiale et temporelle des potentiels récepteurs.
- Les *bâtonnets* contiennent un seul pigment photosensible, la *rhodopsine*, tandis que les *cônes* contiennent trois photopigments dont les sensibilités spectrales sont différentes les unes des autres.

Il s'ensuit que la vision des *couleurs* ainsi que la discrimination des *détails* dans la région *centrale* de la *fovéa* sont assurées par les *cônes*. La *vision périphérique* et la *vision nocturne* sont assurées par les *bâtonnets*, mais l'acuité visuelle est moindre, l'image des objets est plus floue et dépourvue de couleurs.

En résumé, les *cônes* sont sensibles aux variations des couleurs et aux contrastes de luminance. La sensibilité au contraste permet de distinguer les contours des objets. Les *bâtonnets* sont sensibles aux faibles intensités de lumière ; ils permettent la vision nocturne et élargissent le champ de

vision. Ces deux systèmes fonctionnels, photopique et scotopique confèrent à l'oeil humain la capacité de percevoir les détails des objets dans une vaste gamme d'intensités de lumière et de couleurs.

Observations

- Pour les tâches qui exigent la reconnaissance des détails, l'efficacité du système visuel est maximale lorsque la cible se situe dans la ligne primaire de vision et l'image se projette sur la partie centrale de la *fovéa*. L'exécution des tâches fines exigent un niveau élevé d'éclairage.
- De façon générale, la vision photopique est prépondérante lorsque le niveau de luminance dépasse $3,4 \text{ cd.m}^{-2}$, la vision scotopique est prépondérante quand le niveau de luminance est inférieur à $0,034 \text{ cd.m}^{-2}$. Entre ces deux valeurs, la prise d'information visuelle s'effectue en condition de *vision mésopique* (Exemple : travail sur écran à fond sombre et caractères clairs).
- Toutefois, la transition entre ces types de vision est progressive car cônes et bâtonnets travaillent plus ou moins intensément selon le niveau d'éclairage.

4.2. Sensibilité au contraste

La *détection du contraste* est la capacité à percevoir les différences de luminance. Cette fonction est absolument nécessaire pour la perception des contours et des formes. En effet, lorsque la rétine est éclairée de façon uniforme, le système visuel ne fournit aucune information utile. En revanche, il est hautement spécialisé pour informer sur les discontinuités et les gradients de lumière dans le champ visuel [94]. Ainsi, l'oeil perçoit la forme d'un objet parce que ses bords se détachent du fond ; le contour de l'objet apparaît alors comme une différence perceptible entre la luminance de l'objet et celle de la zone qui l'entoure.

Observations

- La sensibilité au contraste augmente avec la *luminance* de l'environnement et avec la *taille* des objets (ou des détails).
- L'oeil est plus sensible au contraste de luminance lorsque la partie externe du champ visuel est plus sombre que le centre et lorsque les bords de l'objet sont nets ; elle est plus faible quand les transitions sont graduées ou indéfinies.
- La sensibilité au contraste est un indice pertinent de fonctionnement du système visuel, utile à la fois pour un diagnostic clinique [70] et

pour prédire la performance de détection chez les pilotes [143].

- La sensibilité au contraste est une aptitude exigée pour certaines *activités professionnelles* telles que l'inspection et le contrôle de produits.

4.3. Résolution temporelle

Le système visuel répond non seulement au contraste dans l'espace, mais aussi dans le temps. En fait, tout contraste dans l'espace implique un contraste temporel à cause du mouvement de la cible sur la rétine, soit parce que les yeux changent de position, soit parce que l'objet se déplace. Cependant, la résolution temporelle de l'oeil se réfère à sa capacité à répondre à des stimulations uniques de courte durée ou à des stimulations répétitives.

Lorsque l'oeil est soumis à des émissions de lumière intermittente (*flashes*) dont la fréquence augmente progressivement, le sujet éprouve d'abord une sensation de papillotement, ensuite il les perçoit comme une lumière continue. Le point de passage de la sensation de papillotement à celle de lumière stable est appelé seuil de fusion et la fréquence minimale des stimuli lumineux intermittents qui donne naissance à une sensation de lumière continue est appelée *Fréquence Critique de Fusion (FCF)* ; elle dépasse rarement 60 Hz. La fréquence critique de fusion varie avec la luminance, la taille, la forme, la localisation sur la rétine et la couleur du stimulus ; elle varie également avec l'adaptation de l'oeil et l'état fonctionnel du sujet [97]. La connaissance de cette propriété de l'oeil est importante pour la qualité de l'éclairage où la fréquence de décharge des tubes fluorescents ou celle des écrans de visualisation (fréquence de balayage vertical du phosphore) peut être perçue et donc être gênante si elle est trop faible.

4.4. Sensibilité spectrale

L'oeil humain est sensible non seulement aux différentes intensités des rayonnements lumineux, mais également aux différentes longueurs d'onde. En effet, à intensité lumineuse égale, les cônes adaptés à la lumière du jour présentent un maximum de sensibilité pour une longueur d'onde d'environ 555 nm, correspondant au jaune-vert. Le bleu est la couleur la moins bien perçue en vision fovéale. L'oeil adapté à la

pénombre présente une sensibilité maximale pour une longueur d'onde d'environ 505 nm, correspondant au bleu-vert (figure 3.7). Autrement dit, en vision *scotopique*, la zone bleu-vert du spectre apparaît plus lumineuse, en vision *photopique*, l'oeil est plus sensible au rouge. Ceci peut s'expliquer par la réfraction que subit un rayon lumineux en traversant l'oeil : les rayons de faible longueur d'onde (bleu) sont fortement déviés et convergent un peu en avant de la rétine ; les rayons rouges convergent un peu en arrière. Autrement dit, l'oeil est myope dans le bleu et hypermétrope dans le rouge. Les rayons dont la longueur d'onde est d'environ 550 nm forment une image nette sur la rétine et donnent une impression plus vive qu'avec d'autres longueurs d'onde de même énergie.

Il existe trois types de cônes, chacun possède un photopigment sensible à la lumière bleue, verte ou rouge. La variété des sensations de couleur résulte des combinaisons différentes de stimulation de ces types de cônes. Quand ils sont stimulés de façon égale, la sensation est celle d'une lumière blanche.

Observations

Dans la perception de la lumière, trois dimensions fondamentales peuvent être distinguées (voir le solide des couleurs, figure 3.8) :

- la *luminosité* qui varie de l'obscurité jusqu'à une luminance élevée,
- la *tonalité chromatique* qui varie autour du cercle des couleurs : bleu → vert → jaune → orange → rouge
- la *saturation* qui varie des couleurs pleines et riches (périphérie du cercle) à des couleurs plus pâles (centre du cercle).

4.5. Adaptation

L'oeil humain peut traiter l'information visuelle dans une grande gamme de luminances (environ 8 unités logarithmiques) grâce à la capacité du système visuel à s'adapter aux variations d'intensité de la lumière ambiante. Ainsi, l'oeil peut détecter un faible signal dans la nuit, une petite étoile dans le ciel ; il peut également distinguer la brillance élevée d'une plage en été ou l'éclat d'un glacier en plein soleil.

Le terme **adaptation** est utilisé pour définir les *modifications de la sensibilité du*

système visuel aux variations d'intensité de la lumière et, plus particulièrement, l'augmentation de la sensibilité de la rétine en obscurité et sa diminution dans un environnement éclairé. L'observation courante montre que la sensibilité de la rétine s'adapte continuellement aux conditions d'éclairage dominantes. Ainsi, pour l'oeil adapté à l'obscurité, la flamme d'une bougie apparaît brillante ; elle est à peine visible pour l'oeil adapté à la lumière. En conduite de nuit, les phares d'une voiture sont aveuglants ; en conduite de jour, les mêmes phares ne sont plus gênants.

4.5.1. Adaptation à l'obscurité

La sensibilité de la rétine aux stimuli visuels augmente lors du passage de la lumière à l'obscurité. Ainsi, dans la vision *photopique*, la limite inférieure de la sensibilité de la rétine est de 1 cd.m^{-2} ; dans la vision *scotopique*, cette limite peut descendre de 0,01 à $0,0001 \text{ cd.m}^{-2}$. Processus lent, l'adaptation à l'obscurité comporte deux phases, une première, rapide et une deuxième, plus lente ; après 25 min, l'oeil est adapté à 80 % ; l'adaptation complète nécessite presque une heure.

Dans l'adaptation à l'obscurité :

- les cônes ne fonctionnent pas et l'acuité visuelle est réduite d'environ 1/10 ;
- la sensibilité à la lumière des bâtonnets augmente ;
- le diamètre pupillaire augmente ;
- l'aberration chromatique⁴ augmente : le jour, le jaune se projette sur la rétine et le bleu en avant ; la nuit, le bleu se projette sur la rétine.

4.5.2. Mécanisme de l'adaptation à l'obscurité

L'adaptation rétinienne est essentiellement de nature *photochimique*. Les récepteurs rétiens contiennent des pigments qui absorbent l'énergie lumineuse. Lorsque la lumière est absorbée, les pigments se décomposent et libèrent une énergie qui génère des potentiels d'action, lesquels sont interprétés comme de la lumière au niveau

⁴ *Aberration chromatique* : les courtes longueurs d'onde (bleu) sont réfractées davantage que les longues (rouge).

cérébral. Dans l'obscurité, le pigment des bâtonnets (*rhodopsine*) est régénéré et il est de nouveau disponible pour capter la lumière. Sa recombinaison en obscurité est assez lente et nécessite un apport suffisant de vitamine A. Une carence en vitamine A s'accompagne de troubles de la vision nocturne (*héméralopie*).

4.5.3. Adaptation à la lumière

Par opposition au phénomène d'adaptation à l'obscurité, l'adaptation à la lumière se manifeste par une diminution de la sensibilité de la rétine aux stimuli visuels. En effet, le passage brusque de l'obscurité à la lumière, un excès de luminance dans le champ visuel, des projecteurs ou phares, des points lumineux dans l'espace visuel provoquent un éblouissement (voir fiche n° 8). L'adaptation à la lumière est un processus plus rapide que l'adaptation à l'obscurité.

4.6. Rôle de la pupille

La quantité de lumière qui pénètre dans l'oeil dépend de l'ouverture du diaphragme pupillaire. Ainsi, le passage brusque de l'obscurité à la lumière déclenche la *constriction réflexe* de la pupille ; la transition d'un environnement éclairé à l'obscurité provoque une *dilatation réflexe* de l'iris (figure 3.9). Le diamètre de la pupille varie alors en fonction de l'intensité de la lumière, il est d'environ 3 à 5 mm, le jour et de 8 mm ou plus, la nuit. La dilatation de la pupille (*mydriasis*) est contrôlée par le système nerveux sympathique ; sa constriction (*myosis*) est sous contrôle parasympathique. Habituellement, le diamètre de la pupille reflète un état d'équilibre entre les influences des systèmes sympathique et parasympathique. Outre les variations réflexes provoquées par les changements d'environnement lumineux, le diamètre de la pupille augmente en situations *émotionnelles*, en état de *stress* et avec la *charge mentale* ; le diamètre de la pupille diminue avec la fatigue et la somnolence et dans la vision de près.

Observations

- La diminution du diamètre de la pupille réduit les erreurs de réfraction dues à l'aberration sphérique⁵ et augmente ainsi l'acuité visuelle.
- La sécrétion d'adrénaline qui accompagne généralement un état de stress provoque une dilatation de la pupille et partant, une diminution de l'acuité visuelle.

5. Fonctions motrices

Les fonctions motrices de l'oeil sont assurées par : (a) les muscles intrinsèques qui *ajustent* le diamètre de la pupille à l'éclairage de l'ambiance et la courbure du cristallin à la distance de la cible (voir ci-dessus) ; (b) les six paires de muscles extrinsèques, fixés à la surface externe des globes oculaires, qui permettent d'*explorer* l'environnement, de *diriger* le regard vers un objet particulier, de le *scruter* et de suivre ses mouvements dans l'espace.

5.1. Réflexe de fixation

Tout objet mobile ou point lumineux apparaissant dans l'environnement visuel provoque un déplacement rapide du regard dans sa direction afin que l'image de l'objet soit amenée sur la fovéa. Le mouvement de l'objet, détecté par la rétine périphérique, déclenche une réponse réflexe - le *réflexe de fixation* - qui transfère le stimulus sur la rétine centrale, condition indispensable au traitement de l'information visuelle [64].

5.2. Mouvements oculaires

Les principaux types de mouvements oculaires sont les microsaccades, les saccades et la poursuite.

5.2.1. Microsaccades

Un oeil immobile ne voit pas. Pour qu'il voie, il doit être animé de très petits mouvements (de 10 à 60 minutes d'arc) pendant les périodes de fixation. Ces microsaccades permettent aux récepteurs rétiniens de balayer continuellement l'image. Sans ces mouvements, l'image s'atténue graduellement.

⁵ *Aberration sphérique* : les rayons lumineux qui pénètrent à la périphérie de la cornée sont réfractés davantage que ceux qui pénètrent dans les zones centrales.

5.2.2. Saccades

Il s'agit de mouvements rapides (environ 20 ms) de saut d'un point de fixation à un autre au cours de l'exploration d'une image ou de la lecture. L'*exploration* implique la recherche et la localisation d'une information nécessaire. La *lecture* comporte une prise d'information. Dans ces deux activités (exploration et lecture), les yeux se déplacent par saccades qui "corrigent" l'écart entre la position de la cible et la zone centrale de la rétine [64]. Entre les saccades, l'oeil a une position stable et fixe une petite aire du champ visuel qui est projetée sur la région fovéale et parafovéale. Cette période d'immobilité de l'oeil (fixation oculaire) dure environ 150 à 200 ms, le nombre de fixations est de 4 à 5 par seconde.

5.2.3. Poursuite

Il s'agit de mouvements lents de pistage d'une cible mobile, déclenchés par le déplacement d'un objet dans le plan frontal. Dans la *poursuite*, les axes des yeux sont parallèles.

5.3. Vision binoculaire

La vision binoculaire permet d'obtenir une image unique par synthèse des images reçues par les deux yeux. Elle améliore l'acuité visuelle et contribue à la vision du relief⁶ et à l'agrandissement du champ visuel. Le système oculomoteur positionne les lignes de vision des deux yeux sur la cible. Ainsi, lorsqu'un objet se rapproche de l'oeil, la rotation interne des yeux assure la focalisation sur les parties correspondantes de la rétine.

Observations

Plus proche est le point de fixation, plus grand est l'angle de convergence, plus intense est la contraction des muscles extra-oculaires [92].

Si l'image de la cible ne se forme pas sur la fovéa, l'acuité pour cette cible diminue. De plus, si les deux lignes de vision ne sont pas pointées sur l'objet, l'image de la cible est double (*diplopie*). Le phénomène de "double image" apparaît lorsque la

⁶ L'estimation de la distance relative des objets ("perception d'une troisième dimension") s'explique principalement par la disparité des images rétinienne des deux yeux [93].

coordination des muscles oculaires est perturbée ou quand la fatigue visuelle est excessive.

La fusion des images fournies par chaque oeil s'opère au niveau du cortex cérébral. Cette fusion exige le fonctionnement des voies optiques, l'intégrité des deux yeux, leurs mouvements conjugués et la coordination entre l'accommodation et la convergence. En effet, lorsqu'un objet est examiné de plus près, les axes optiques des deux yeux convergent vers l'intérieur (figure 3.9), la courbure du cristallin augmente, la pupille se rétrécit, l'acuité visuelle augmente.

6. Rôle du système nerveux

Le système nerveux assure à la fois l'intégration des messages visuels et le contrôle des muscles qui orientent le regard, modifient l'ouverture de la pupille et la courbure du cristallin. En effet, focaliser l'image d'un objet sur la rétine implique une succession d'opérations : diriger les yeux vers l'objet, projeter l'image de l'objet sur la partie la plus sensible de la rétine, explorer les détails ou poursuivre les déplacements de l'objet afin de garder son image sur la fovéa. Focaliser signifie surtout assurer la netteté de l'image d'objets situés à des distances différentes par l'ajustement de la courbure du cristallin. Enfin, la perception des détails fins nécessite également l'intervention d'un mécanisme qui limite la quantité de lumière qui pénètre dans l'oeil ; le diaphragme pupillaire remplit cette fonction. Toutes ces opérations sont coordonnées par le système nerveux.

Observations

- Les modifications de l'état fonctionnel du système nerveux (variations du niveau de vigilance, état de stress, médicaments) affectent la précision du contrôle nerveux sur les fonctions visuelles.
- Un éclairage inadéquat sollicite de façon excessive les mécanismes nerveux qui contrôlent la réception et le traitement de l'information visuelle. Un mauvais éclairage contribue à la fatigue visuelle et mentale.

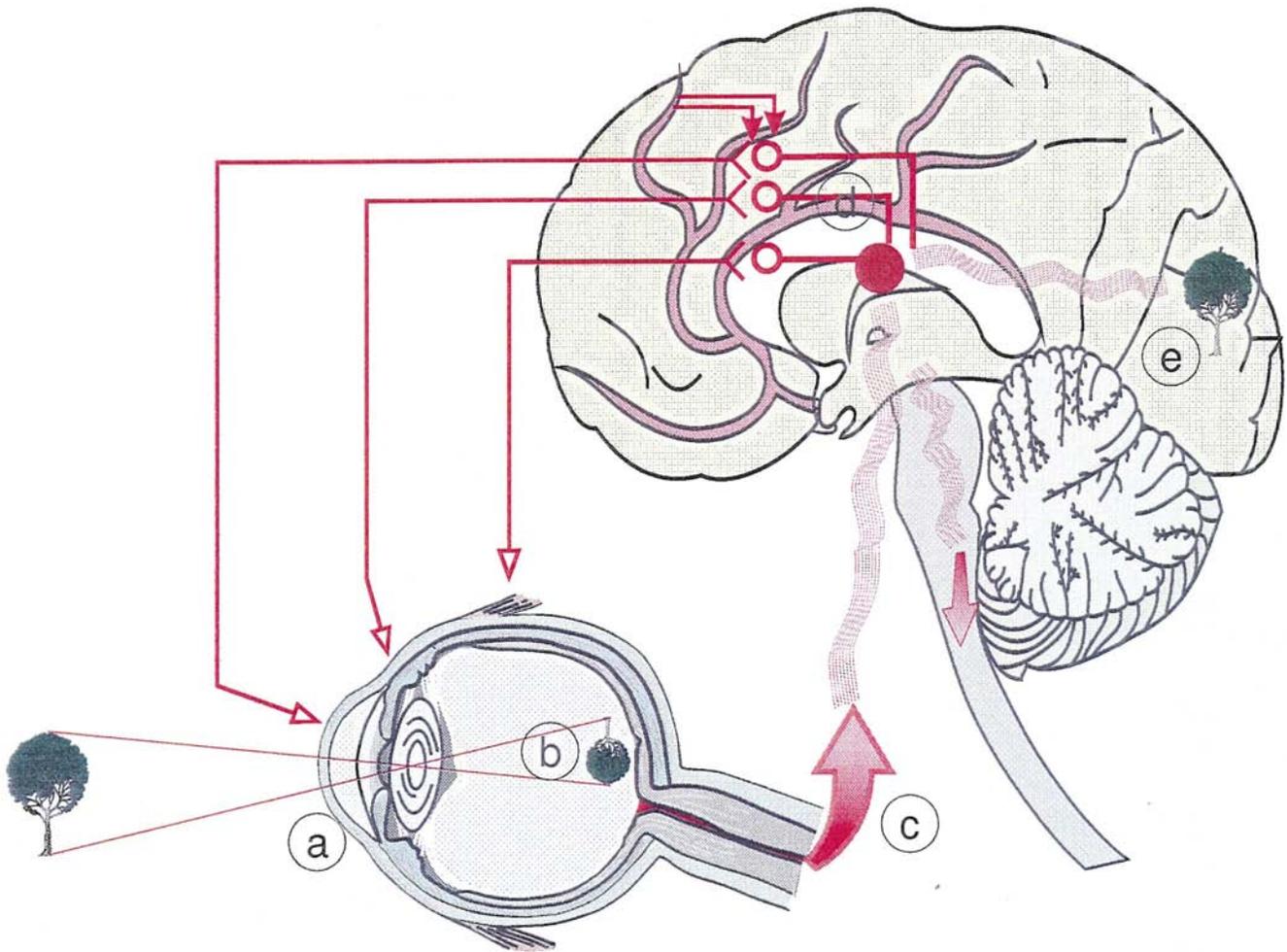


Figure 3.1. Système visuel (d'après [47]) :

a - Cornée et cristallin

b - Projection de l'image sur la rétine

c - Transmission des signaux par le nerf optique au cerveau

d - Contrôle des muscles oculaires

e - Perception visuelle

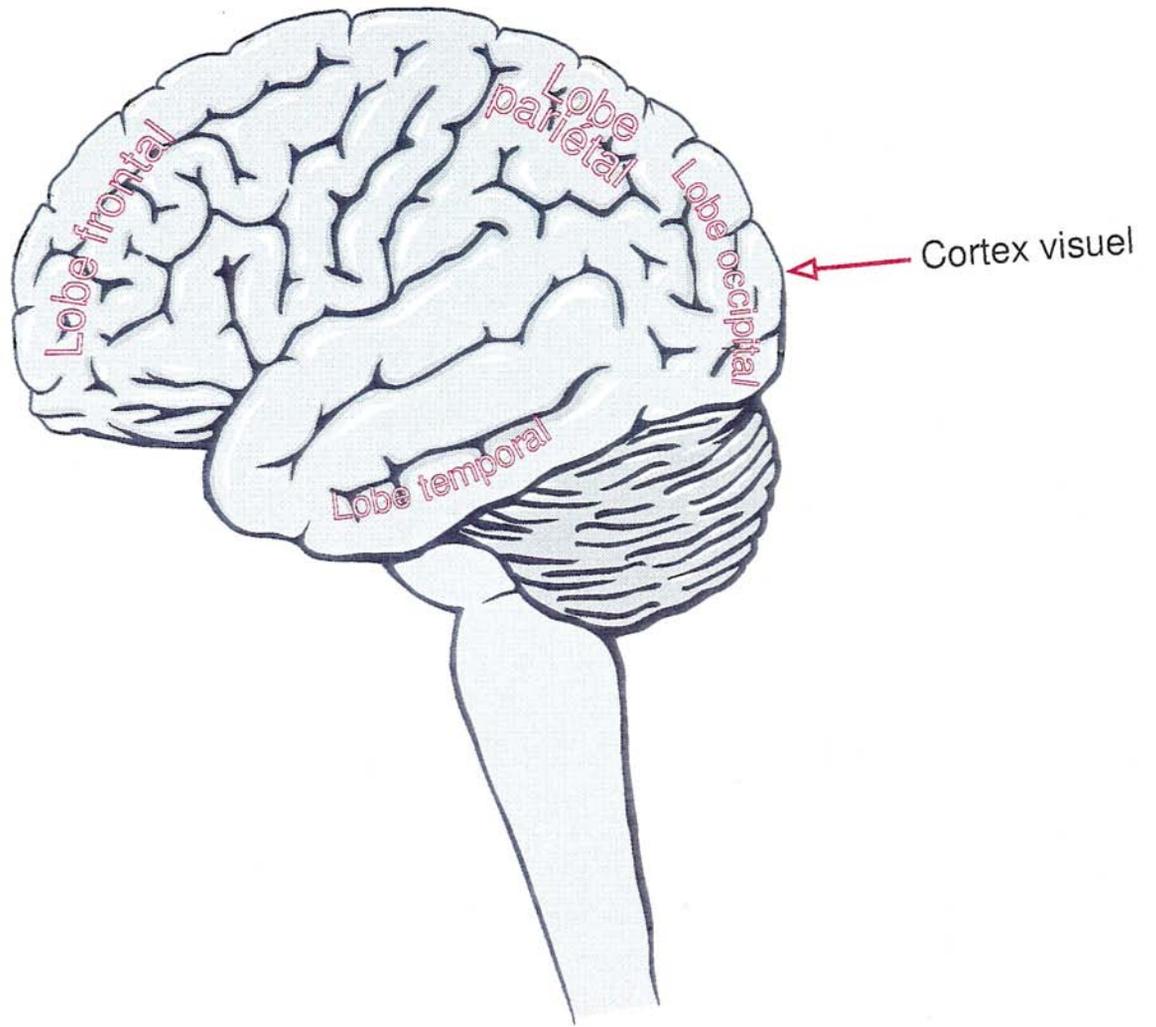


Figure 3.2. Localisation corticale de la vision

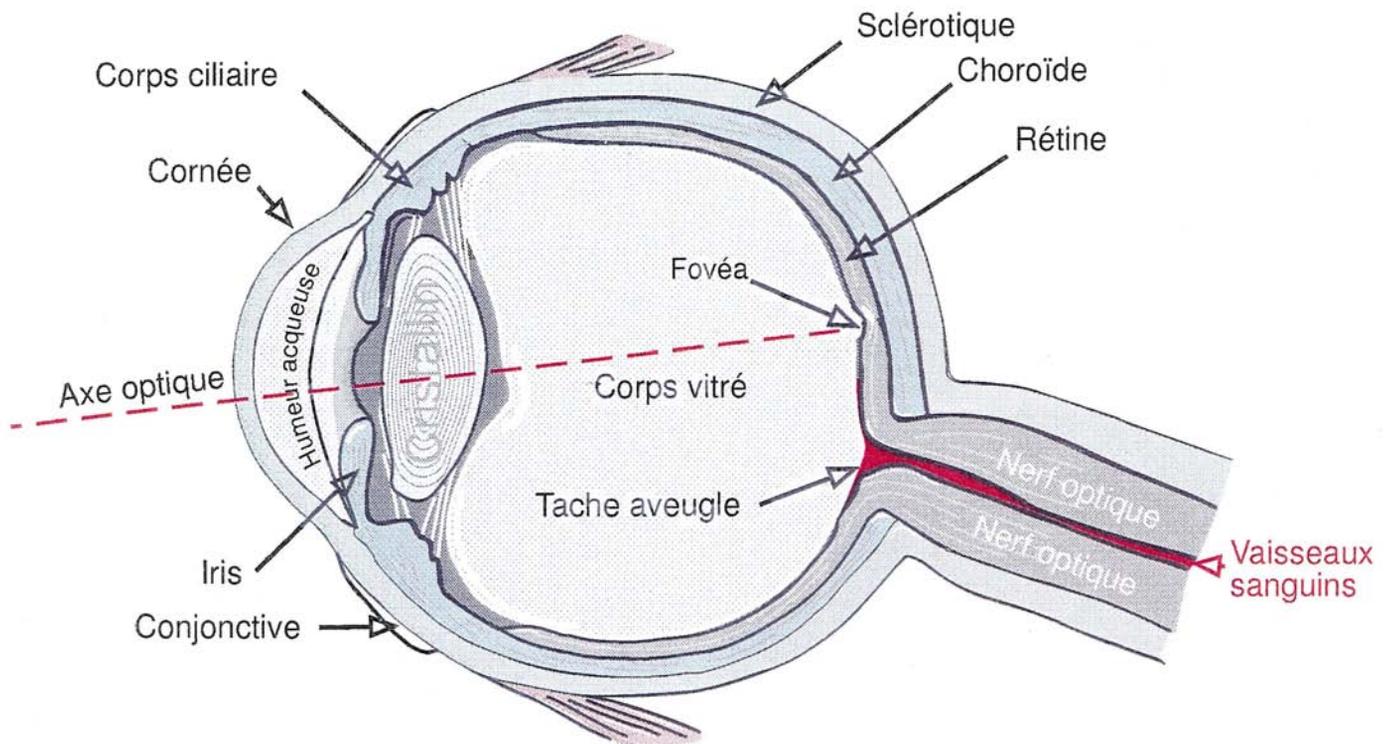


Figure 3.3. Coupe transversale de l'oeil humain

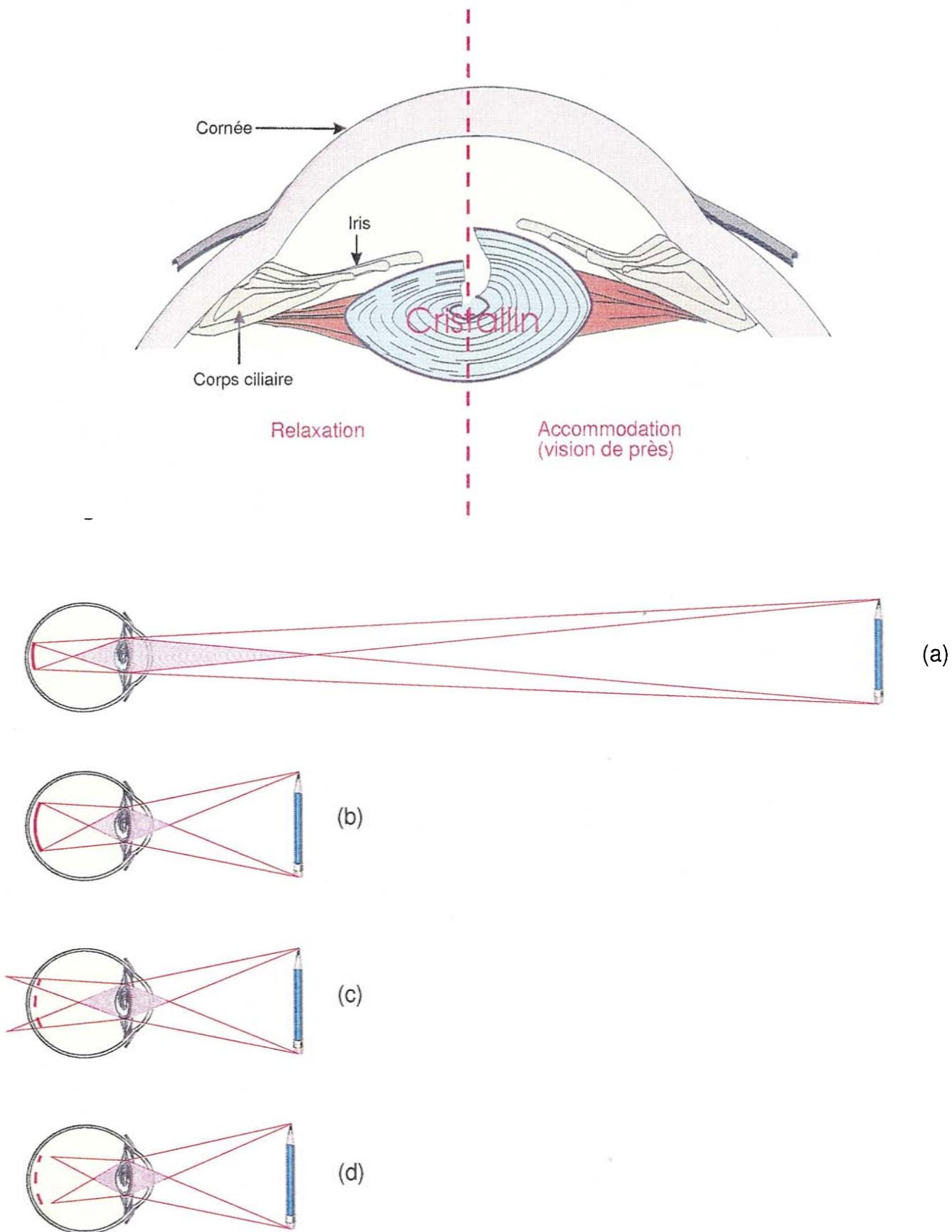


Figure 3.5. Focalisation normale et erreurs de réfraction

- (a) Vision normale de loin
- (b) Vision normale de près
- (c) Hypermétropie
- (d) Myopie

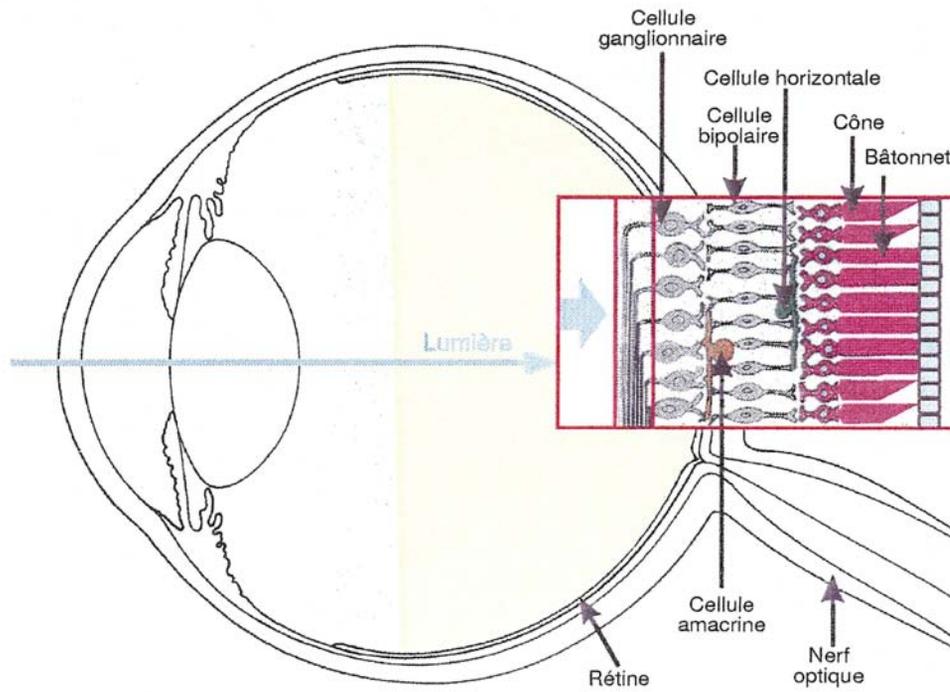


Figure 3.6. Connexion des cônes et des bâtonnets dans la rétine

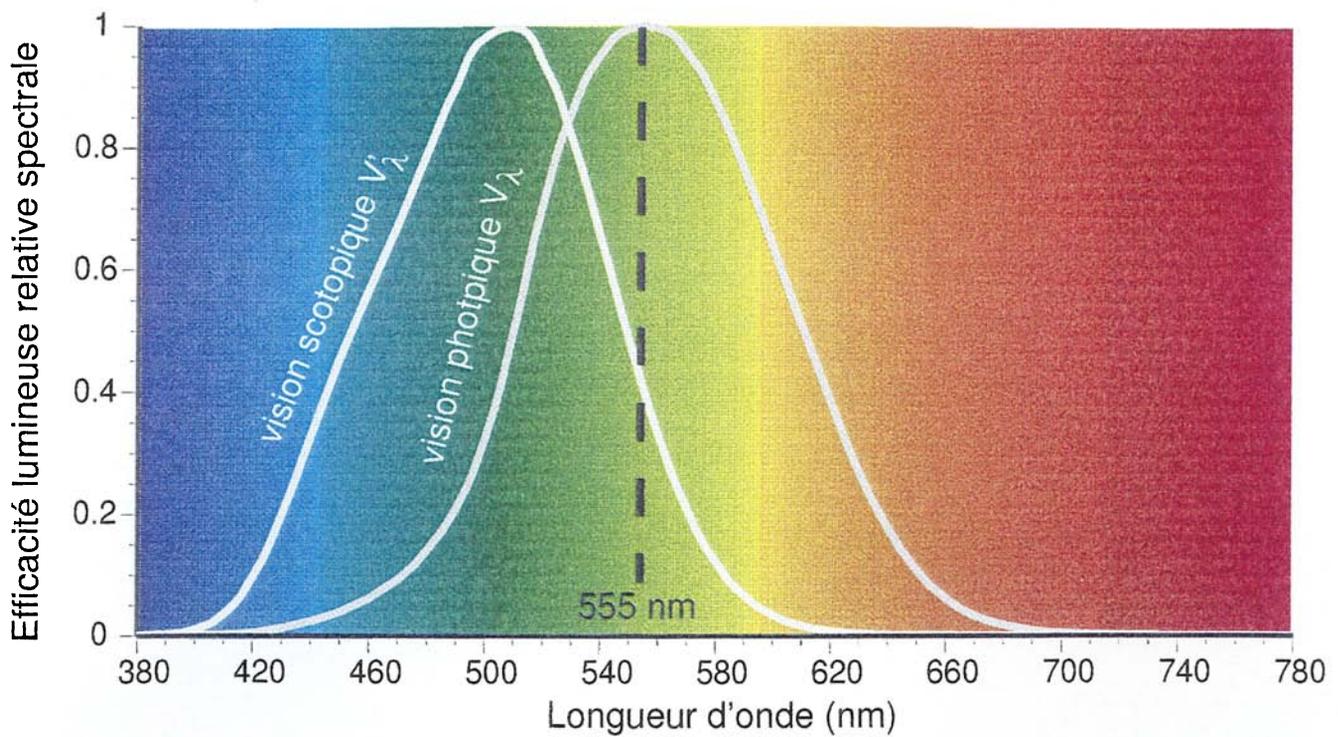


Figure 3.7. Efficacité lumineuse relative spectrale

V_λ pour la vision photopique

V'_λ pour la vision scotopique

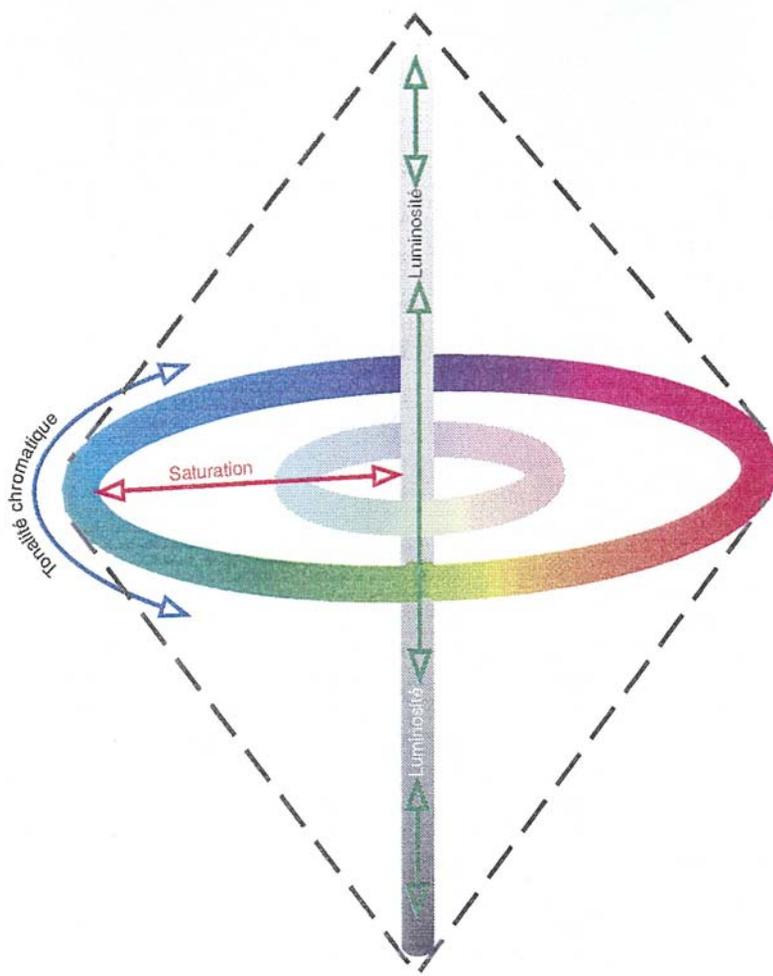


Figure 3.8. Solide des couleurs

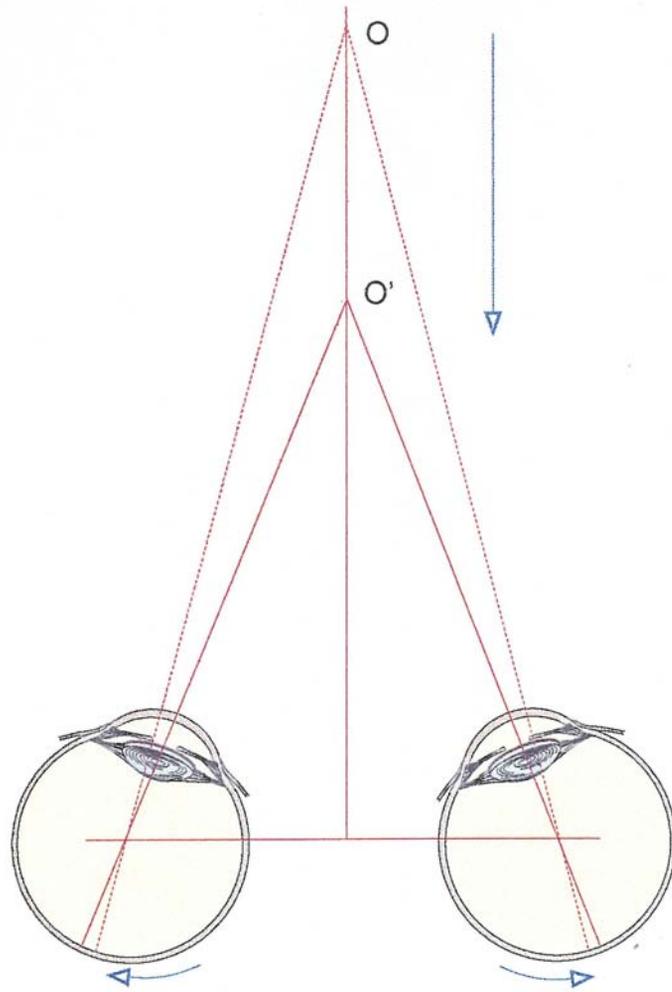


Figure 3.9. Convergence des yeux à l'approche de la cible

FICHE n°4

APTITUDES VISUELLES

Le terme *aptitudes visuelles* a deux acceptions ; la première, à caractère restreint, se réfère aux capacités élémentaires du système visuel ; la deuxième se réfère aux capacités professionnelles du sujet et plus précisément aux aptitudes visuelles requises pour effectuer un certain travail. En fait, la distinction entre ces deux acceptions n'est pas absolue. Ainsi, la sensibilité au contraste et la sensibilité chromatique sont à la fois des *propriétés élémentaires* des récepteurs rétiniens (voir fiche n° 3) et des *qualités nécessaires* pour accomplir certaines tâches visuelles ou pour exercer certaines professions (voir ci-dessous).

1. Acuité visuelle

L'expression *acuité visuelle* se réfère au pouvoir séparateur de l'oeil, à la capacité de l'oeil à distinguer deux points séparés par un certain angle visuel, et plus précisément, à sa *capacité à distinguer les détails fins d'un objet*. Elle se réfère également au degré de précision dans la vision des formes. De façon générale, plus petit est le détail distingué, plus grande est l'acuité visuelle de l'individu. D'un point de vue technique, les mesures de l'acuité visuelle font référence à l'angle visuel sous lequel est vu le plus petit détail. La grandeur de l'image d'un objet (ou d'un détail) projetée sur la rétine varie directement avec la dimension physique de l'objet et inversement avec sa distance à l'oeil. Cette relation entre la dimension de l'objet et sa distance à l'oeil définit *l'angle visuel* : plus éloigné est l'objet, plus petit est l'angle visuel, plus petite est l'image projetée sur la rétine. L'acuité visuelle est la réciproque de l'angle visuel, une acuité visuelle élevée permet de distinguer des détails vus sous un petit angle visuel. L'acuité visuelle est mesurée en minutes d'arc ; la mesure exprime la dimension du plus petit détail (seuil de dimension) pouvant être distingué (figure 4.1). Ce détail doit être clairement spécifié ; il peut s'agir de l'espace blanc qui sépare deux barres parallèles noires,

l'ouverture d'un anneau brisé **C** ou les branches horizontales de la lettre **E**.

Observations

- Deux types d'acuité visuelle ont été décrites [94]: (a) l'*acuité de résolution* qui est la capacité de détecter l'intervalle minimum qui sépare deux stimuli-tests dans le champ visuel et (b) l'*acuité de reconnaissance* qui est la capacité à distinguer deux cibles de formes semblables, comme "G" et "C".
- En pratique ophtalmologique¹, c'est l'acuité de reconnaissance qui est examinée à l'aide d'*optotypes* - caractères ou signes standardisés - de différentes tailles, présentés à une distance de 6 m pour la vision de loin et d'environ 33 cm pour la vision de près. Le sujet doit les identifier et les nommer. L'acuité de reconnaissance peut inclure des processus perceptifs plus complexes et ne peut pas être attribuée à la seule acuité de résolution de l'oeil.

L'acuité visuelle est une propriété de l'oeil humain qui n'est pas constante. En effet, l'acuité visuelle augmente avec le niveau d'éclairement, le contraste objet/fond, la netteté du stimulus (objet, détail, caractère) et la durée d'exposition du stimulus. Il convient, cependant, d'ajouter que l'augmentation de l'acuité visuelle avec le niveau d'éclairement, le contraste ou la durée d'exposition n'est pertinente qu'entre certaines limites. Ainsi, un éclairage qui dépasse 1000 lx n'influence plus l'acuité ; un contraste de luminance trop élevé peut provoquer un éblouissement gênant. Il existe également une durée optimale de présentation d'un stimulus en fonction de la tâche visuelle (lecture, inspection, etc.).

¹ L'acuité visuelle mesurée au cours d'un examen ophtalmologique indique une performance maximale en conditions de confort visuel (durée illimitée de présentation de l'optotype, contraste optimal...). En situations de travail, les aptitudes visuelles s'exercent dans une ambiance lumineuse différente, les exigences visuelles de la tâche et l'état fonctionnel de l'opérateur varient dans le temps. Il est donc peu probable qu'une acuité visuelle de 10/10 mesurée lors d'un examen ophtalmologique se retrouve en conditions réelles de travail [122].

Dans certaines limites, les différents facteurs qui influencent la visibilité des objets peuvent se compenser mutuellement. Ainsi, pour les personnes âgées, une augmentation du niveau d'éclairage peut compenser la diminution de l'acuité visuelle [24]. En revanche, un faible niveau d'éclairage peut être compensé par une augmentation du contraste. Enfin, des aides optiques (loupes, verres correcteurs...) augmentent la visibilité des petits détails.

Implications professionnelles

- De nombreuses fonctions de sécurité, des travaux dangereux et de précision requièrent une bonne acuité visuelle, une bonne vision stéréoscopique, un équilibre musculaire normal et une capacité de discrimination chromatique ;
- Une bonne acuité visuelle *de loin* est exigée dans certaines professions : pilote, timonier, navigateur, conducteur de véhicule de transport en commun, conducteur de grue à tour ou d'engins de chantier..;
- Une bonne acuité visuelle *de près* est exigée dans les professions d'ajusteur, horloger, bijoutier, typographe, dessinateur, fraiseur, tourneur, brodeuse, lingère, stoppeuse...
- Une bonne *vision nocturne* est indispensable dans certains métiers (pêcheurs en mer, scaphandriers, garde-forestiers, mineurs de fond, aviateurs, conducteurs de métro et de train, routiers, chauffeurs de taxi...) qui impliquent souvent des activités dans des sites non éclairés [122]

2. Résistance à l'éblouissement

Un excès de luminance dans le champ visuel provoque un *éblouissement* (voir fiche n° 8) ; il peut être produit directement, par une source lumineuse, ou indirectement, par les réflexions de la lumière sur des surfaces qui se comportent comme un miroir. L'éblouissement s'accompagne d'un affaiblissement des fonctions visuelles (diminution de l'acuité visuelle, de la vision des couleurs et du relief, rétrécissement du champ visuel...) suivi d'un *temps de récupération* plus ou moins prolongé selon les individus².

Implications professionnelles

Une bonne résistance à l'éblouissement est exigée chez les routiers, pompier, conducteur de grue à tour

² La *résistance à l'éblouissement* peut être testée en mesurant le temps de récupération de la sensibilité aux stimuli lumineux après une courte exposition à un éclair très intense [97].

et engins de chantier, acteurs (de théâtre, de cinéma, de TV), soudeurs, forgeron, fondeurs...

3. Vision des couleurs

L'oeil peut distinguer des lumières ayant des compositions spectrales différentes; la vision normale de couleurs est dénommée "trichromatisme normal" (voir fiche n° 3). La vision des couleurs varie selon l'état d'adaptation de l'oeil et la localisation de la cible dans le champ visuel ; il existe également des différences inter-individuelles qui concernent surtout les *dyschromatopsies*³, anomalies congénitales ou acquises de la vision des couleurs [97].

Implications professionnelles.

- Une excellente vision des couleurs est requise dans des tâches de contrôle d'image couleur à la TV, de mélange de colorants sous contrôle visuel (teinture, peinture), de tapisserie, restauration de tableaux, carrosserie, lithographie, cartographie, photo couleurs, en éclairagisme, en philatélie, dans des opérations de tris (diamants, perles, coton, huiles, fruits, viande, fourrures)...
- De même une bonne vision des couleurs est nécessaire en électronique, dans des tâches de CAO, DAO, en biologie, chimie, histologie, anatomo-pathologie, dermatologie [122].

4. Champ visuel

La capacité à localiser les stimuli visuels dans l'espace dépend du **champ visuel** lequel est défini comme l'espace perçu en condition d'immobilité de la tête et des yeux. Limité par les obstacles anatomiques (nez, orbite), le champ visuel **monoculaire** s'étend du point central de fixation jusqu'à 90° du côté externe (temporal), 60° interne (nasal), 70° inférieur et 50° supérieur. En vision binoculaire, il existe un recouvrement partiel des deux champs dans la partie centrale. Le champ visuel **binoculaire** a un diamètre angulaire d'environ 180° horizontalement et d'environ 120° verticalement (figure 4.2).

En conditions de *vision diurne* (photopique), la plupart des fonctions visuelles, telles que l'acuité visuelle, la sensibilité au contraste, la reconnaissance

³ *Dyschromatopsie* - Incapacité de distinguer les couleurs ; la plus fréquente est d'origine congénitale et se manifeste dans l'axe vert-rouge (daltonisme).

des couleurs, décroissent du centre vers la périphérie du champ visuel. Ainsi, le **champ visuel** inclut [47] :

- une zone de vision distincte et nette qui s'étend du point de fixation à 1° ;
- une zone moyenne (angle de vision de 1° à 40°) où les objets ne sont pas nets mais sont remarqués lorsqu'ils sont très contrastés ;
- une zone externe (angle de vision de 40° à 70°) où l'oeil ne distingue que les objets en mouvement⁴. Lorsque l'objet est immobile, son image disparaît rapidement à cause d'une *adaptation locale* de la rétine.

Les limites du champ visuel peuvent diminuer avec l'âge, l'opacité partielle du cristallin, le port de lunettes (lunettes de protection, verres teintés, verres correcteurs de grandes puissances, montures larges), la prise de boissons alcoolisées.

L'intégrité du champ visuel est indispensable dans certaines *professions*, telles que conducteurs d'engins de transport, de ponts roulants, de chariots élévateurs, de grues et de bulldozers. Elle est également nécessaire dans les activités de surveillance et les travaux dangereux.

Observations

Il existe de grandes différences entre le champ visuel statique (périmétrie clinique) tel qu'il est mesuré en ophtalmologie et le *champ visuel fonctionnel ergonomique* [121]. En premier lieu, dans la plupart des activités professionnelles, le travailleur n'utilise pas un seul oeil mais les deux yeux simultanément car il doit non seulement détecter la présence d'un objet, mais également l'identifier et le reconnaître ; de plus, ni le regard ni la tête de l'observateur ne sont immobiles par rapport aux objets à identifier. En deuxième lieu, l'objet qui doit être perçu n'est pas un point lumineux, mais une structure complexe, de plus, le fond sur lequel l'objet se détache n'est pas homogène mais plus ou moins structuré. Enfin, les effets de l'attention, de la fatigue, de l'apprentissage qui doivent être évités dans un examen clinique interviennent toujours dans un travail qui se prolonge des heures sans interruption. Ces différences expliquent qu'il est difficile de prévoir le comportement d'un opérateur au travail en l'absence de mesures effectuées *in situ*

⁴ Lorsque l'opérateur est engagé dans l'exécution d'une tâche, l'apparition de stimuli "parasites" (objets mobiles, points lumineux...) dans le champ visuel périphérique peut distraire l'attention ou provoquer un éblouissement perturbateur (voir fiche n° 8).

ou, au moins, au cours d'un travail simulé en laboratoire.

5. Perception visuelle

La perception visuelle comporte la détection, l'identification et l'interprétation des messages transmis par la rétine au cerveau. La perception des objets et de leurs particularités physiques (forme, brillance, couleur, position dans le champ visuel, mouvements) dépend à la fois de l'environnement lumineux, du contexte et de l'expérience individuelle.

La perception nette d'un objet est conditionnée par :

- les dimensions de l'objet par rapport à sa distance de l'oeil (angle de vision) : plus l'objet est près de l'oeil, plus grand est l'angle de vision, plus grande est son image sur la rétine, plus nettement est perçu l'objet,
- la luminance de l'objet,
- le contraste de luminance entre objet et fond,
- les capacités visuelles du sujet.

La vitesse de perception - durée minimale de présentation d'un signal pour qu'il soit perçu - varie également en fonction du niveau d'éclairement et du contraste de luminance entre la cible et l'environnement. En fait, il existe une relation étroite entre l'éclairage, d'une part, et l'acuité visuelle, la sensibilité au contraste et la vitesse de perception, d'autre part. Une perception rapide est exigée dans certaines professions (pilotes d'avion, par exemple) ; la performance dans des tâches de lecture est également conditionnée par la vitesse de perception.

6. Modification des capacités visuelles avec l'âge

Il existe une détérioration "naturelle" des fonctions visuelles ; lorsque l'oeil vieillit, sa structure et son fonctionnement se modifient. Dans le processus de vieillissement, la sensibilité de l'oeil à l'environnement visuel se détériore progressivement [57]. Parmi les fonctions visuelles qui se dégradent avec l'âge, il convient de mentionner la diminution du pouvoir d'accommodation, la diminution de l'acuité visuelle et de la vitesse d'adaptation à l'obscurité, la diminution de la résistance

à l'éblouissement et le rétrécissement du champ visuel.

Il est alors nécessaire de connaître l'influence de l'âge sur les capacités visuelles pour :

- **adapter** le niveau de l'éclairage et la **distribution** des luminances dans le champ visuel selon les capacités visuelles des personnes âgées ;
- assurer la **compatibilité** entre les exigences visuelles des tâches et les aptitudes visuelles des personnes qui doivent les exécuter.

6.1. Accommodation

Le pouvoir d'accommodation diminue avec l'âge (figure 4.3) ; le cristallin s'épaissit, son indice de réfraction diminue et il devient de plus en plus rigide [71].

La vitesse et la précision de l'accommodation diminuent avec l'âge : le punctum proximum (PPA) s'éloigne (voir tableau 4.1), le punctum remotum diminue légèrement ou ne change pas.

Du fait de ces modifications, l'**amplitude de l'accommodation** (distance en mm entre punctum proximum et punctum remotum d'accommodation) diminue avec l'âge. Chez les personnes âgées, même avec une bonne correction, l'amplitude de l'accommodation est limitée.

Age (ans)	PPA (cm)
16	8
32	12
44	25
50	50
60	100

Tableau 4.1

Observations

L'inconfort visuel qui accompagne un travail de près prolongé chez les presbytes non corrigés est dû à l'intensification des contractions toniques du muscle ciliaire pour compenser la perte d'élasticité du cristallin.

6.2. Acuité visuelle, adaptation et discrimination chromatique

L'acuité visuelle d'une personne ayant une vue normale baisse d'environ 25 %

entre 20 et 60 ans (figure 4.4). Les performances visuelles dans des tests de sensibilité au contraste ou de discrimination des anneaux de Landolt diminuent avec l'âge. De plus, par rapport à des personnes jeunes, les personnes âgées ont besoin d'un niveau plus élevé d'éclairage, d'un contraste plus fort et d'une durée de présentation du stimulus plus longue pour atteindre le même degré d'efficacité que les jeunes [13 ; 14 ; 15].

Cette baisse s'explique, entre autres, par la diminution du facteur de transmission⁵ de la lumière à travers les milieux optiques, l'augmentation de la diffusion de la lumière dans les milieux optiques [94] et la réduction du diamètre pupillaire. Ces altérations diminuent la sensibilité à la lumière dans la partie centrale de la rétine et partant, réduisent l'acuité visuelle. De plus, la sensibilité à la lumière dans la périphérie de la rétine augmente et l'oeil est plus sensible à l'éblouissement.

La vision mésopique⁶ devient de plus en plus difficile avec l'âge et la latence d'adaptation à l'obscurité augmente [97].

La résistance à l'éblouissement diminue avec l'âge ; les effets perturbateurs de l'éblouissement sont plus marqués chez les personnes âgées que chez les jeunes. Ainsi, la conduite de nuit est plus difficile à cause de l'allongement du **temps de récupération** chez les personnes âgées (voir § 2).

La vision des couleurs des personnes âgées ne présente pas de modifications susceptibles d'entraver leur travail. Toutefois, la discrimination chromatique pour les courtes longueurs d'onde diminue ; cet effet s'explique, entre autres, par le jaunissement du cristallin [94].

⁵ Facteur de transmission (*transmittance*). C'est le rapport du flux énergétique ou lumineux transmis au flux incident.

⁶ La vision dans des conditions de faible éclairage est appelée *mésopique* (entre la vision photopique et scotopique). Les personnes âgées ont des difficultés à détecter les signaux peu lumineux (travail sur écran, par exemple).

6.3. *Champ visuel et perception de l'espace*

Le champ visuel se rétrécit avec l'âge. A ceci s'ajoutent d'autres modifications qui limitent la perception de l'espace, tels que le ralentissement et la limitation des mouvements des yeux et de la tête.

7. Implications professionnelles

Chez les personnes âgées, la baisse de l'acuité visuelle et de la discrimination chromatique ainsi que la réduction relative du champ visuel sont particulièrement prononcées dans des conditions de faible éclairage ; la performance visuelle des sujets âgés peut alors être améliorée par l'augmentation de l'éclairage et du contraste. L'efficacité d'un niveau d'éclairage plus élevé est évidente surtout dans des tâches de difficulté et d'exigence (précision et rapidité) modérées [24].

Toutefois, les personnes âgées sont particulièrement gênées lorsqu'elles travaillent dans une ambiance sombre (travail nocturne à l'extérieur, travail en chambre noire) ou lorsque la tâche exige une discrimination des détails fins et des couleurs [122]. De même, dans la conduite routière nocturne, la diminution des aptitudes visuelles (diminution de la sensibilité au contraste, augmentation de l'effet perturbateur de l'éblouissement et allongement du temps de réponse aux stimuli visuels) constitue un handicap pour les personnes âgées. Néanmoins, ces insuffisances sont le plus souvent compensées par un surplus d'expérience et de prudence.

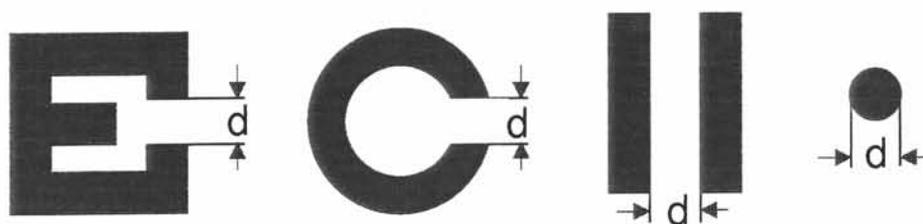


Figure 4.1. Objets-test utilisés pour déterminer l'acuité visuelle ; d : taille du détail critique

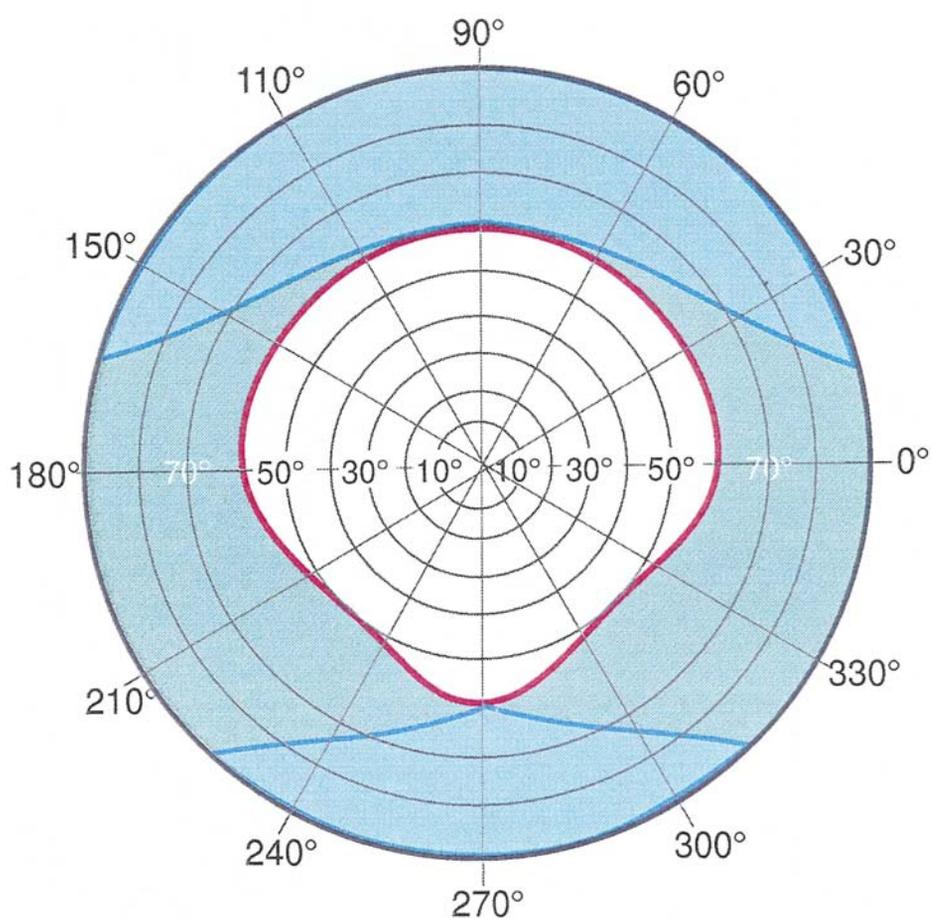


Figure 4.2. Champ visuel binoculaire
en blanc : zone de recouvrement des deux champs visuels monoculaires
en vert : régions temporales vues par l'oeil droit et gauche
en bleu : limitation du champ visuel

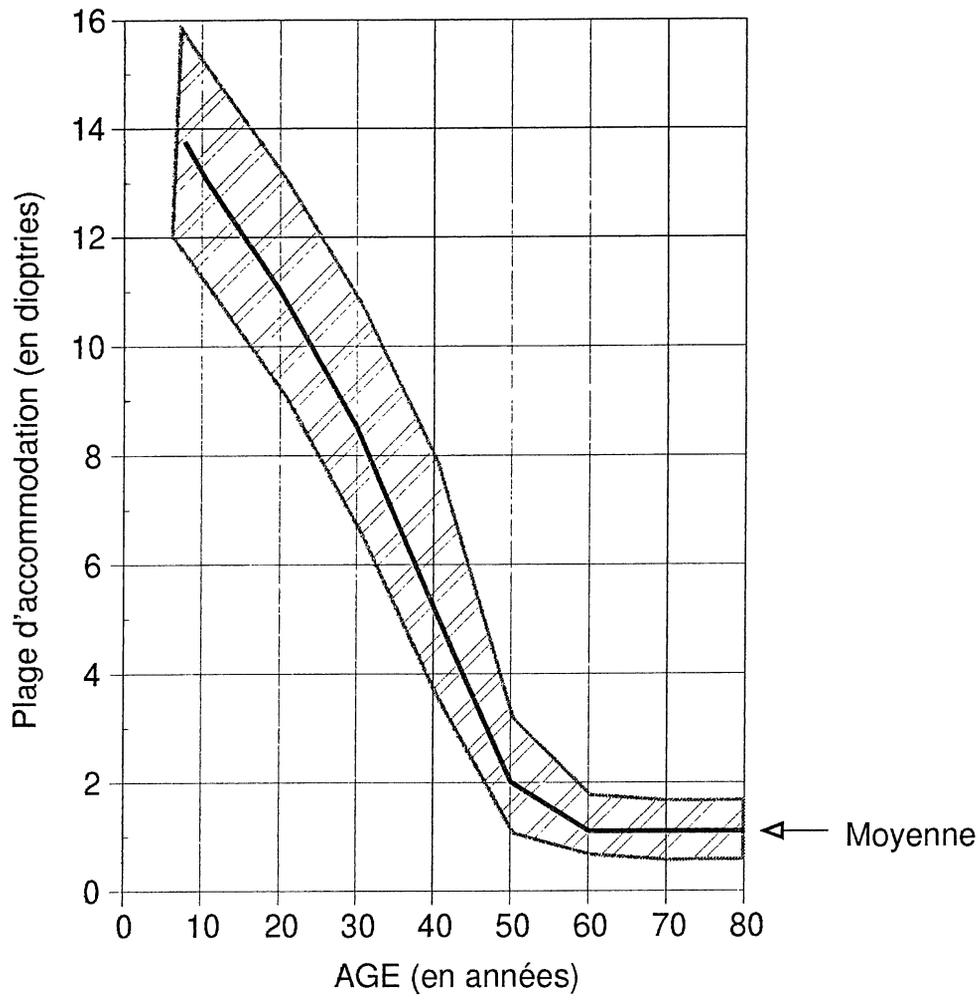


Figure 4.3. Diminution de la puissance d'accommodation avec l'âge

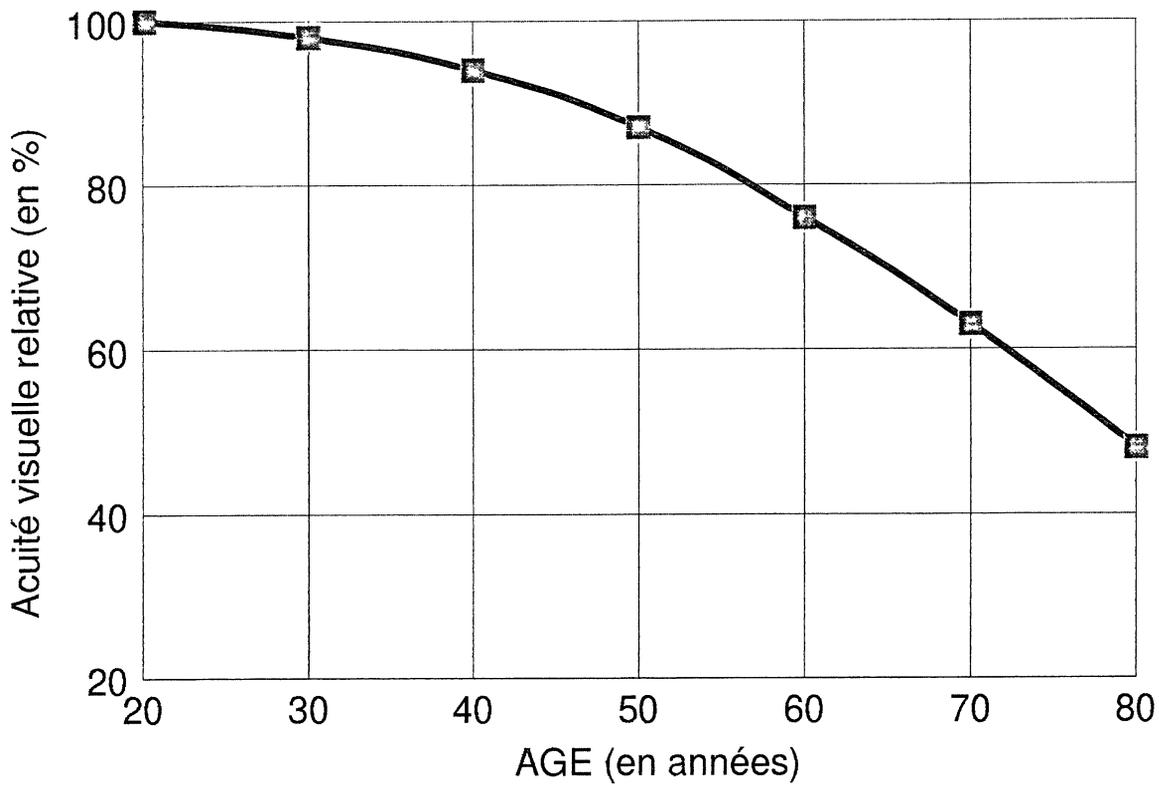


Figure 4.4. Diminution de l'acuité visuelle avec l'âge

FICHE n° 5

TYPES ET SYSTEMES D'ECLAIRAGE

1. Eclairage naturel

Le développement de l'éclairage artificiel n'a pas éliminé la préférence de la plupart des personnes pour la lumière du jour dans l'habitat et au travail. En effet, la lumière solaire et sa répartition spectrale constituent le stimulus auquel *l'oeil* s'est adapté "naturellement" au cours du développement phylo et ontogénétique.

Au poste de travail, la lumière naturelle contribue à la *satisfaction visuelle* car elle permet le contact avec le monde extérieur et introduit une certaine variabilité spatio-temporelle dans l'ambiance. Ainsi, la diversité et le jeu des ombres et des zones éclairées créés par la lumière du jour est acceptée, voire appréciée dans l'intérieur des écoles et des petits bureaux, les couloirs et les chambres d'hôpitaux. Dans d'autres cas (ateliers, magasins), cette diversité peut être gênante ; il est alors nécessaire de compléter l'éclairage naturel par un éclairage artificiel. La lumière du soleil, recommandable pour la maison dans les climats modérés est, en général, déconseillée pour les zones de travail. En effet, l'éclairage naturel ne fournit pas de façon stable la quantité et la distribution de la lumière exigées par la tâche visuelle et les besoins de confort.

En ce qui concerne l'éclairement, la *quantité* de lumière naturelle reçue au poste de travail est inversement proportionnelle à la distance qui la sépare des fenêtres. Le niveau d'éclairement des diverses zones de travail varie alors selon leur emplacement par rapport aux fenêtres. Lorsque l'éclairage naturel est assuré par le toit, il peut fournir un niveau d'éclairement assez élevé et uniforme, mais il présente des risques d'échauffement excessif et d'éblouissement (voir fiche n° 8). Le niveau d'éclairement varie selon l'heure, les conditions météorologiques, les régions ou d'une saison à une autre.

Sur le plan *qualitatif*, deux aspects sont à examiner : la distribution de la lumière et le

risque d'éblouissement. Etant donné que la lumière du jour provient à la fois d'une source directe, le soleil, et indirecte, la voûte céleste, la *distribution de lumière et d'ombres* ainsi que la netteté des ombres dépendent du rapport entre les éclairements fournis par ces deux sources [50]. Ainsi, lorsque la lumière du soleil est dominante, le flux lumineux presque horizontal qui traverse les fenêtres peut créer des ombres très nettes ; lorsque le ciel est couvert, les ombres peuvent disparaître. Au poste de travail, la présence ou l'absence des ombres n'influence pas la performance dans une tâche de lecture mais lorsque la tâche est en relief, l'absence d'ombre ou l'existence d'ombres multiples peuvent affecter les performances visuelles (voir fiche n° 7).

L'éclairage naturel peut constituer une source d'*éblouissement* direct ou indirect (voir fiche n° 8). En ce qui concerne l'éblouissement direct, il convient de contrôler la position de l'opérateur par rapport aux fenêtres afin d'éviter qu'il travaille face aux fenêtres. Lorsqu'il n'est pas possible de changer la position de l'opérateur pour éviter l'éblouissement, il faut faire appel à d'autres moyens, tels que rideaux, stores, paralumes ou cloisons qui permettent de filtrer et/ou de réorienter la lumière pénétrant par les fenêtres ou par le toit. Ces moyens sont également efficaces pour réduire l'éblouissement dû au ciel surtout lorsqu'il s'agit des étages supérieurs de bâtiments élevés avec une large vue sur le ciel. L'éblouissement du ciel peut être également limité en réduisant la dimension des fenêtres.

Conclusions

Les *avantages* de la lumière naturelle sont surtout d'ordre *qualitatif* :

- La lumière naturelle est très homogène, sa luminosité est élevée et elle diffuse bien,
- L'éclairage naturel contribue au bien-être car il assure une communication visuelle avec l'extérieur,
- Des variations modérées de l'éclairage naturel contribuent au maintien de la vigilance lors des tâches visuelles monotones.

L'utilisation de l'éclairage naturel au poste de travail présente cependant des inconvénients majeurs car :

- il varie en *intensité*, *direction* et *spectre* au cours de la journée, avec les saisons et la nébulosité du ciel. Ces variations peuvent avoir des répercussions négatives sur l'efficacité et la sécurité.
- il est parfois source d'*éblouissement* et d'échauffement excessif.

Pour les ambiances de travail, et plus particulièrement *dans la zone de travail, la lumière directe du soleil est à proscrire* [24].

2. Classification des systèmes d'éclairage

Les systèmes d'éclairage sont souvent classés selon leur disposition ou localisation par rapport à la tâche ou à l'objet éclairé en éclairage *général*, *localisé* et *local* ou d'appoint (figure 5.1). Ils sont également classés selon la fraction du flux lumineux atteignant directement le plan de travail en *direct*, *indirect* et *mixte* (figure 5.2).

2.1. Classification selon la disposition et la localisation [24 ; 94]

2.1.1. Eclairage général

Il s'agit d'un système qui fournit un éclairage horizontal relativement uniforme sur toute la surface du plan de travail. Pour ce faire, les luminaires sont disposés de façon régulière ; le rapport entre l'espacement des luminaires et la hauteur utile ne doit pas dépasser 1 à 1,5 [4]. L'éclairage général est facile à installer et confère une grande flexibilité pour déterminer l'emplacement de la tâche.

2.1.2. Eclairage localisé

Il s'agit de zones d'éclairage général qui fournissent différents niveaux d'éclairage aux différents secteurs de travail. Ce système, appelé également *éclairage général localisé*, constitue une alternative plus économique que celle de l'éclairage général car la lumière est diffusée dans toute la pièce et met en évidence en même temps la tâche visuelle ou la zone de travail. L'éclairage localisé permet une meilleure utilisation de la lumière pour la zone de travail et offre la possibilité de placer les

luminaires de façon à éviter ou à minimiser la gêne provoquée par l'éblouissement direct, les réflexions de voile ou les ombres.

2.1.3. Eclairage local (éclairage d'appoint)

Il s'agit d'un système qui éclaire une zone relativement limitée, occupée par la tâche et l'environnement proche. L'éclairage peut être fourni par des luminaires montés à proximité de la tâche ou par des spots lumineux plus éloignés (lampes portables ou appliques murales). En complément de l'éclairage général ou de l'éclairage localisé dans la zone de travail, il est conseillé [4] d'ajouter un **éclairage local** lorsque :

- la tâche visuelle est particulièrement difficile dans une zone limitée,
- il faut assurer une luminance élevée dans une zone relativement restreinte,
- il est nécessaire d'orienter la lumière afin de percevoir la forme et la structure des objets,
- un obstacle projette une ombre sur la zone de travail,
- des objets à faible facteur de réflexion doivent être observés sur un fond brillant,
- la capacité visuelle réduite de certaines personnes nécessite un niveau d'éclairage plus élevé,
- il faut compenser la réduction du contraste provoquée par l'éclairage général.

L'éclairage local constitue un moyen économique qui assure un niveau élevé d'éclairage sur une petite surface et permet en même temps des ajustements individuels. Il présente toutefois certains inconvénients car il peut gêner les collègues s'il est mal orienté. En général, l'utilisation exclusive d'un éclairage local n'est pas recommandée. En revanche, lorsqu'il est associé à un éclairage général dont le niveau d'éclairage représente 20 à 30 % de l'éclairage local, il constitue un *éclairage supplémentaire* ou *d'appoint*. De cette façon il est possible d'éviter une sursollicitation de l'adaptation rétinienne puisque l'écart de luminance entre les différentes zones du champ visuel est moindre.

En résumé, il existe trois grandes classes d'éclairage intérieur utilisé aux postes de travail.

L'éclairage général qui fournit un éclairage uniforme sur toute la zone de travail.

L'éclairage localisé qui fournit des niveaux différents d'éclairage selon la zone de travail et facilite la concordance entre le niveau d'éclairage et l'emplacement de la tâche.

L'éclairage local qui constitue une combinaison de l'éclairage de base (général ou localisé) et une source de lumière fixée à proximité de la zone réelle de travail. Il est utilisé de préférence :

- lorsqu'une zone restreinte nécessite une augmentation du niveau d'éclairage,
- lorsqu'un éclairage flexible, dirigé vers la tâche peut améliorer la visibilité des détails,
- lorsqu'il est impossible ou qu'il n'est pas nécessaire d'installer un éclairage général.

2.2. Classification selon la fraction du flux lumineux atteignant directement le plan de travail

En fonction du taux de lumière diffusée par les luminaires vers le plan de travail et le plafond, plusieurs types d'éclairage peuvent être distingués [24 ; 4 ; 94] (voir tableau 5.1).

2.2.1. Eclairage direct

Dans un système d'éclairage direct, les luminaires dirigent 90 % à 100 % du flux lumineux vers le bas. La distribution de la lumière, large ou concentrée (éclairage direct extensif ou intensif), peut varier en fonction du dispositif réfléchissant la lumière, de la finition et le contour du projecteur et des moyens de protection contre l'éblouissement (grille de défilement, par exemple). L'éclairage direct peut être utilisé très largement à condition d'éviter ou de minimiser les risques d'éblouissement direct ou indirect et les voiles dus aux réflexions.

2.2.2. Eclairage semi-direct

Les unités d'éclairage semi-direct distribuent la lumière de façon prédominante (60 à 90 %) vers le bas, une faible proportion est dirigée vers le plafond et la partie supérieure des parois. Les caractéristiques de ce type d'éclairage sont essentiellement les mêmes que celles de l'éclairage direct, mais la composante

dirigée vers le haut tend à adoucir les ombres et améliorer les rapports de luminance entre les différentes zones de la pièce. Cependant, lorsque les montages sont trop proches du plafond, un excès de lumière au plafond peut réduire le confort visuel.

2.2.3. Eclairage général diffus (mixte)

Ce système d'éclairage comporte des luminaires qui diffusent la lumière en proportion approximativement égale (40 à 60 %) vers le haut et vers le bas. Dans ce système, l'Association Française de l'Eclairage (AFE) inclut une catégorie particulière d'éclairage - **direct-indirect** ou mixte - qui diffuse très peu de lumière latéralement et réduit le risque d'éblouissement direct ; il est donc préférable au système général diffus où les luminaires diffusent la lumière de manière presque égale dans toutes les directions. L'éclairage général diffus combine les caractéristiques de l'éclairage direct et indirect. Il est acceptable pour des pièces ayant des surfaces très réfléchissantes. Les rapports de luminance sont en général bons et les ombres provenant de la lumière directe sont adoucies par la lumière réfléchie par le plafond. Le risque d'éblouissement peut être évité si les lampes ou les tubes sont masqués à la vue directe ; en réduisant l'espace entre les luminaires ou en les disposant de façon à ne pas diffuser la lumière vers la tâche, il est possible de diminuer davantage le risque d'éblouissement. Toutefois, si les luminaires sont trop proches du plafond, la luminance du plafond peut devenir excessive par rapport à celles des luminaires.

2.2.4. Eclairage semi-indirect

Un système d'éclairage qui diffuse entre 60 et 90 % du flux lumineux vers le haut est appelé semi-indirect. Il présente des caractéristiques similaires au système indirect à une exception : la composante dirigée vers le bas produit une luminance proche de celle du plafond. Toutefois, si cette composante est trop élevée et non maîtrisée avec des moyens de protection appropriés, il existe un risque d'éblouissement direct ou par réflexion.

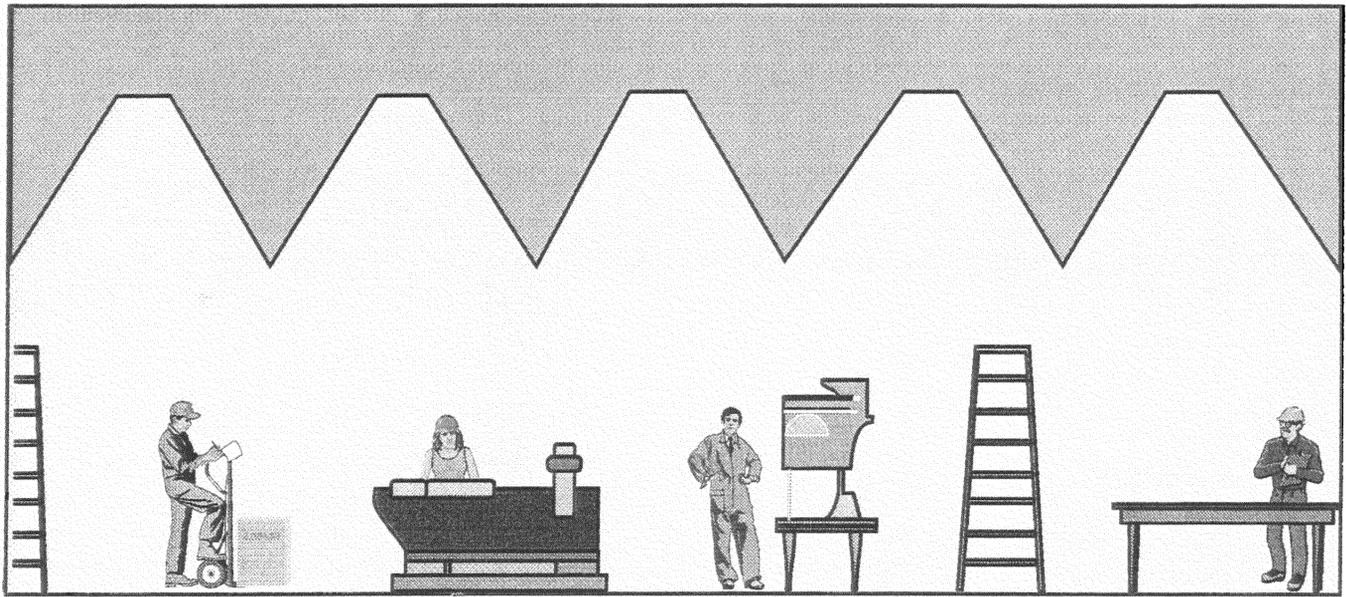
2.2.5. Eclairage indirect

Le système d'éclairage indirect dirige 90 à 100 % de la lumière vers le plafond et la partie haute des parois. Dans une installation bien conçue, le plafond tout entier devient la source primaire d'éclairage et les ombres sont virtuellement éliminées. De même, l'éblouissement direct et par réflexion est minimisé. Il est souhaitable de suspendre les luminaires à une certaine distance du

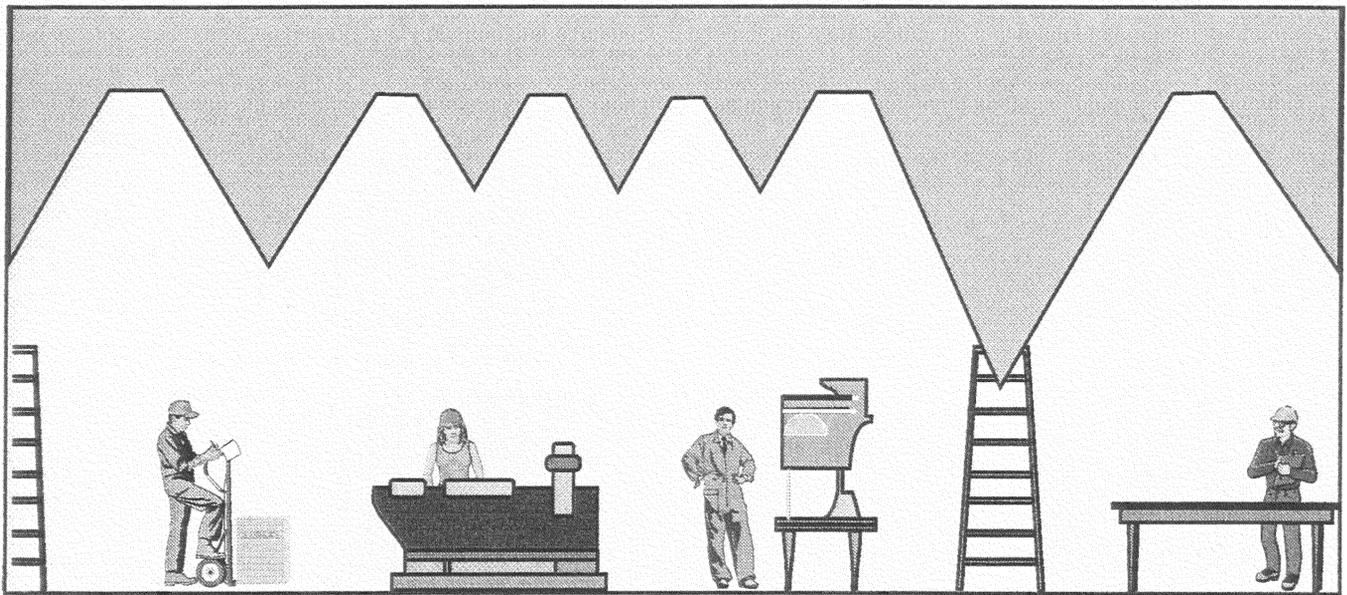
plafond pour ne pas avoir un plafond trop éclairé et donc éblouissant ainsi que pour des raisons de sécurité. Etant donné que dans ce système, le plafond et la partie supérieure des murs doivent refléter la lumière sur le plan de travail, le coefficient de réflexion de ces surfaces doit être élevé. Par rapport aux autres systèmes, l'éclairage indirect est moins utilisé dans l'ambiance de travail.

	Diffusion de la lumière (% du total)	
	Vers le plafond	Vers le plan de travail
Direct	0 - 10 %	90 - 100 %
Semi-direct	10 - 40 %	60 - 90 %
Direct-indirect	40 - 60 %	40 - 60 %
Semi-indirect	60 - 90 %	10 - 40 %
Indirect	90 - 100 %	0 - 10 %

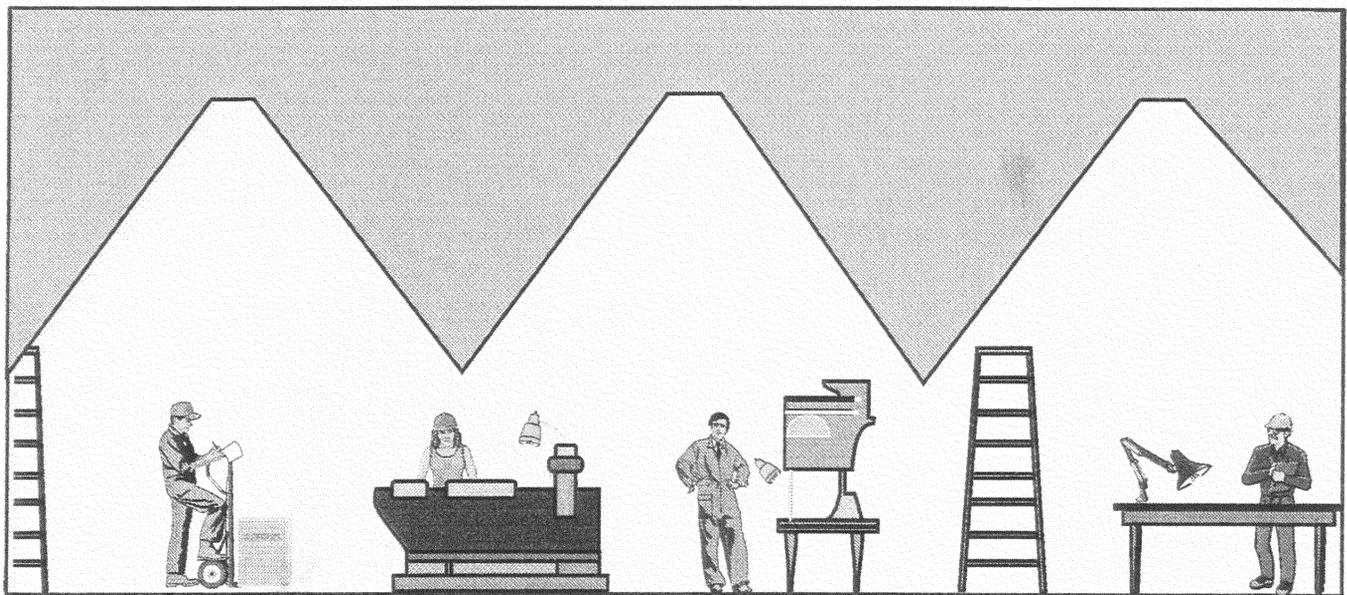
Tableau 5.1 : Répartition de la lumière selon différents types d'éclairage



(a)



(b)



(c)

Figure 5.1. Eclairage général (a), localisé (b) et local ou d'appoint (c)

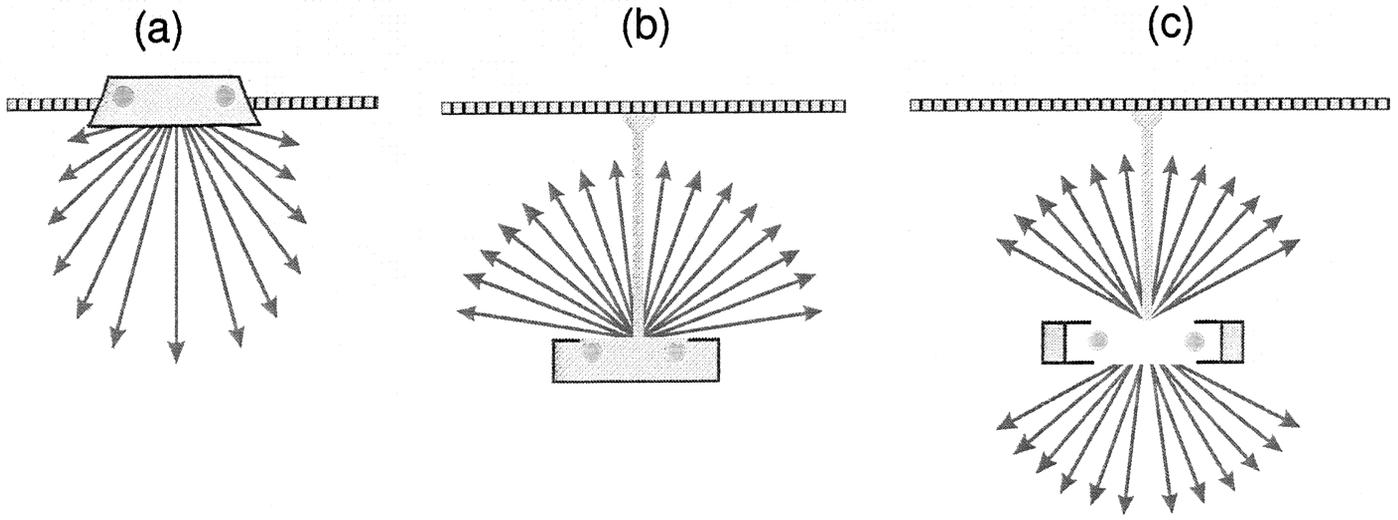


Figure 5.2. Eclairage direct (a), indirect (b) et mixte (c)

ECLAIRAGE QUANTITATIF

1. Observations préliminaires

A vant de présenter les niveaux d'éclairage recommandés pour différentes ambiances ou activités professionnelles, quelques observations semblent utiles pour comprendre la valeur et les limites d'application de ces recommandations. Ces observations doivent répondre à deux questions : Pourquoi les recommandations et les normes sont-elles formulées en termes d'éclairage et non pas en luminance ? Pourquoi les valeurs d'éclairage recommandées sont exprimées plutôt sous forme de fourchettes que de valeurs fixes et quelles sont les critères de choix d'une valeur ou d'une autre ?

1.1. Luminance et éclairage

Une première observation concerne la *luminance* et l'*éclairage*. La visibilité d'un objet dépend de sa luminance et du contraste entre l'objet et le fond. La luminance d'une tâche visuelle dépend en premier lieu du niveau d'éclairage, mais aussi d'un ensemble de facteurs tels que les réflexions des surfaces qui entrent dans le champ visuel de l'opérateur, la direction du regard et la localisation des personnes qui travaillent dans un environnement commun. En l'absence de précisions sur ces facteurs, lorsqu'il s'agit de concevoir un système d'éclairage, il est impossible de formuler des recommandations d'éclairage "quantitatif" en termes de luminance. Les recommandations sont alors exprimées en termes de *niveaux d'éclairage* à réaliser sur la surface considérée [4]. Toutefois, lorsqu'il s'agit d'évaluer les qualités ergonomiques d'un éclairage existant, il est indispensable de prendre en compte à la fois l'*éclairage* (niveau, répartition spatiale) et les *luminances* (rapports des luminances dans le champ visuel). Autrement dit, dans la *conception* d'une installation, les recommandations sont formulées en termes d'éclairage (niveau moyen, uniformité, rapports) ; dans l'ergonomie de *correction*, les propositions sont exprimées à la fois en termes d'éclairage et de luminance.

1.2. Critères de choix

Ce paragraphe concerne à la fois les *critères de choix* d'un système d'éclairage (sécurité, performance, confort, satisfaction visuelle) et les *valeurs* proposées (valeurs uniques ou fourchettes, valeurs minimales ou valeurs moyennes) selon le critère adopté. Ainsi, la luminance minimale qui permet de distinguer les traits d'un visage humain est d'environ 1 cd.m^{-2} ; cette valeur est obtenue, dans des conditions normales d'éclairage, au moyen d'un éclairage horizontal d'environ 20 lx [16]. Cette valeur de 20 lx constitue d'ailleurs le *minimum d'éclairage* pour les intérieurs où personne ne travaille. Pour des zones où le travail est continu, l'éclairage minimum recommandé est de 200 lx, indépendamment des exigences de la tâche. Enfin, le *niveau d'éclairage moyen préféré*¹ se situe entre 1 000 et 2 000 lx. Ces exemples montrent que les valeurs de référence peuvent varier en fonction du critère choisi. En effet, lorsqu'il s'agit d'un critère de *sécurité*, il est impératif de fixer une valeur minimale. Lorsque le critère est la *satisfaction* visuelle, la valeur considérée comme optimale (environ 2 000 lx) est une moyenne résultant d'une préférence majoritaire. Lorsque le critère est l'activité ou la *tâche* à effectuer dans une zone de travail donné, il est apparu nécessaire de remplacer les recommandations de valeurs uniques par des *fourchettes d'éclairage* pour chaque zone ou activité (CIE). Cette flexibilité dans la détermination des niveaux d'éclairage permet aux ingénieurs de concevoir les systèmes d'éclairage en fonction des besoins spécifiques.

¹ Plusieurs recherches ont été effectuées pour établir le niveau d'éclairage préféré par des personnes travaillant dans des conditions d'éclairage fluorescent, la qualité de l'éclairage (absence d'éblouissement) étant soigneusement contrôlée. Les sujets devaient classer les éclairages en "satisfaisant", "trop sombre" ou "trop brillant". Les résultats montrent qu'il n'existe pas un niveau d'éclairage qui satisfasse tout le monde. Néanmoins, le pourcentage le plus élevé de réponses considérant l'éclairage comme satisfaisant correspond à un niveau de $\approx 2 000 \text{ lx}$.

1.3. Evaluation de la qualité d'un éclairage

Lorsqu'il s'agit d'évaluer la qualité d'un éclairage existant, de diagnostiquer et corriger un éclairage inadéquat, l'intervention ne peut se limiter à un constat d'écart par rapport aux valeurs stipulées par les normes ou recommandations et à un réajustement pour mettre en accord le niveau réel avec celui prescrit. Les normes ont un caractère impératif uniquement lorsqu'il s'agit de la sécurité au travail. Pour ce qui concerne les activités professionnelles, les valeurs prescrites ont un caractère indicatif. Ceci explique pourquoi les textes officiels recommandent des valeurs *minimales*, la CIE des *fourchettes* et les associations nationales (AFE, par exemple) des *niveaux moyens*. Leur utilité en tant que système de référence est indéniable. Néanmoins, *la variété des situations réelles impose des ajustements selon les exigences visuelles des tâches et les aptitudes individuelle des personnes qui les effectuent.*

2. Niveaux d'éclairagements recommandés

2.1. Valeurs minimales stipulées par les textes officiels (voir aussi [33]).

2.1.1. Code du travail, art.R.232-7-2

Eclairage général, valeurs minimales

Pendant la présence du personnel sur les lieux travail, les niveaux d'éclairage mesurés au plan de travail ou, à défaut, au sol, doivent être au moins égaux aux valeurs indiquées dans les tableaux 6.1 et 6.2.

Locaux affectés au travail et leurs dépendances	Valeurs minimales d'éclairage
• Voies de circulation intérieures	40 lux
• Escaliers et entrepôts	60 lux
• Locaux de travail, vestiaires et sanitaires	120 lux
• Locaux aveugles affectés à un travail permanent	200 lux

Tableau 6.1

Espaces extérieurs	Valeurs minimales d'éclairage
• Zones et voies de circulation extérieures	10 lux
• Espaces extérieurs où sont effectués des travaux à caractère permanent	40 lux

Tableau 6.2

2.1.2. Circulaire du 11. 04. 1984

Le tableau 6.3 donne des exemples de valeurs d'éclairage minimal pour certaines activités, l'éclairage pouvant être obtenu par des éclairages localisés de la zone de travail en complément de l'éclairage général.

Eclairage minimal	Type d'activité
200 lux	• Mécanique moyenne, dactylographie, travaux de bureau
300 lux	• Travail de petites pièces, bureau de dessin, mécanographie
400 lux	• Mécanique fine, gravure, comparaison de couleurs, dessins difficiles, industrie du vêtement
600 lux	• Mécanique de précision, électronique fine, contrôles divers
800 lux	• Tâche très difficile dans l'industrie ou en laboratoire

Tableau 6.3

2.2. Valeurs moyennes visant à assurer la sécurité et à éviter la fatigue visuelle

2.2.1. Niveaux d'éclairage

Il s'agit des valeurs d'éclairage recommandées en Grande Bretagne par la direction de la sécurité et santé au travail [77]. Les valeurs proposées, issues des actes normatifs, concernent à la fois l'éclairage moyen de la zone de travail et l'éclairage minimal mesuré à n'importe quel point à l'intérieur de cette zone (voir tableau 6.4). Les plans sur lesquels l'éclairage doit être fourni dépendent de la disposition de la tâche. Si celle-ci est située surtout dans un seul plan (horizontal, comme dans un bureau ou vertical, comme dans un magasin ou entrepôt), l'éclairage proposé se réfère à ce plan. S'il n'existe pas de plan défini ou s'il en existe plusieurs, les éclairages recommandés doivent être fournis pour le plan horizontal et assurer des facteurs de réflexion élevés des surfaces dans la zone de travail.

Activité générale	Emplacement ou type de travail	Eclairage (lx)	
		Moyen	Minimum
• Déplacement de personnes, machines et véhicules (1)	Parc de camions, corridor, routes	20	5
• Déplacement de personnes, machines et véhicules dans des zones à risque ; travail grossier qui ne nécessite pas une perception de détails (1)	Construction, nettoyage, excavations et travail de la terre, docks, zones de chargement, usines d'embouteillage et de conserves	50	20
• Travail nécessitant une perception limitée de détails (2)	Cuisines, usines d'assemblage de grands composants, poteries	100	50
• Travail nécessitant la perception de détails (2)	Bureaux, travail sur feuilles métalliques, reliure	200	200
• Travail nécessitant la perception de détails fins (2)	Bureaux de dessin, ateliers d'assemblage de composants électroniques, production textile	500	200

Tableau 6.4 : Eclairage moyen et minimum mesuré [77]

- (1) Seule la sécurité a été prise en considération
 (2) Le but est d'éviter la fatigue visuelle

2.2.2. Rapports d'éclairage

Les relations entre l'éclairage de la zone de travail et les surfaces adjacentes sont importantes car de grandes différences d'éclairage entr'elles peuvent provoquer une gêne ou affecter la sécurité dans les zones où les déplacements sont fréquents. Il

s'agit de situations dans lesquelles les personnes sont exposées de façon prolongée à des différences notables entre l'éclairage local et localisé ou passent de l'extérieur à l'intérieur. Afin de prévenir un danger ou l'inconfort, les recommandations du tableau 6.5 doivent être suivies.

Activité générale	Emplacement ou type de travail	Rapport maximal d'éclairage
		Zone de travail : adjacente
• Chaque tâche est éclairée individuellement et la zone périphérique faiblement éclairée	Eclairage local d'un bureau	5 : 1
• Deux zones adjacentes, mais l'une est plus faiblement éclairée que l'autre	Eclairage localisé dans un magasin	5 : 1
• Deux zones de travail différemment éclairées séparées par une barrière et avec passage fréquent de l'une à l'autre	Zone d'entrepôts à l'intérieur d'une usine et plateforme de chargement à l'extérieur	10 : 1

Tableau 6.5 : Rapports maximaux d'éclairage [77]

3. Recommandations de la C.I.E.

Lorsqu'il existe un conflit entre les éclairages moyens recommandés (tableau 6.4) et les rapports maximaux d'éclairage (tableau 6.5), il faut prendre les valeurs les plus élevées. Une zone de transition doit être ménagée entre deux zones adjacents si les rapports sont très élevés.

La CIE recommande 9 catégories d'éclairage pour différentes zones de travail, activités ou tâches à effectuer [24] (voir tableau 6.6). Chaque catégorie comporte 3 valeurs (niveaux d'éclairage) qui permettent de choisir le niveau approprié selon les caractéristiques physiques de la tâche (contraste, facteur de réflexion...), les exigences de performance et les capacités visuelles de l'opérateur (voir fiche n° 10).

Eclairage recommandé (en lx)	zone de travail ou activités
20 - 30 - 50	Circulation extérieure, zones de travail
50 - 100 - 150	Circulation, orientation, visites
100 - 150 - 200	Pièces à usage temporaire pour travail
200 - 300 - 500	Tâches avec exigences visuelles simples
300 - 500 - 750	Tâches avec exigences visuelles moyennes
500 - 750 - 1000	Tâches avec exigences visuelles élevées
750 - 1000 - 1500	Tâches avec exigences visuelles difficiles
1000 - 1500 - 2000	Tâches avec exigences visuelles spéciales
> 2000	Performances dans des tâches très méticuleuses

Tableau 6.6 : Recommandations d'éclairage pour différentes zones ou activités [24]

3.1. Surface de référence

Lorsque le travail s'effectue à l'intérieur, l'éclairage est mesuré sur la **surface de référence** qui est le **plan de travail** ou plan utile. Par convention, cette surface est horizontale, située à 0,85 m du sol et limitée par les murs. Lorsque l'emplacement des postes de travail est connu et clairement spécifié, la surface de référence peut être précisée pour chacune des **zones de travail** ou tâches.

3.2. Critères de choix

3.2.1. Valeur moyenne

La valeur moyenne de chaque catégorie représente le niveau d'éclairage recommandé. Elle doit être utilisée lorsque les facteurs cités ci-après ne s'appliquent pas.

3.2.2 - Valeurs maximales

Les valeurs maximales doivent être utilisées si :

- la tâche présente des facteurs de réflexion ou des contrastes faibles,
- le coût de corrections des erreurs est élevé,
- les exigences visuelles du travail sont élevées (détails fins à distinguer, par exemple),
- l'exécution de la tâche demande à la fois précision et rapidité,

- la capacité visuelle du travailleur est en dessous de la normale.

3.2.3. Valeurs minimales

Les valeurs minimales peuvent être utilisées si :

- les facteurs de réflexion et les contrastes sont élevés,
- il n'existe pas d'exigence particulière de vitesse et précision d'exécution,
- la tâche est exécutée occasionnellement.

4. Niveaux d'éclairage recommandés par l'A.F.E. [4]

La communauté européenne recommande des valeurs moyennes d'éclairage visant à garantir aux utilisateurs et aux responsables de l'entretien des installations : (a) le maintien des performances visuelles à un niveau satisfaisant et d'une ambiance lumineuse confortable ; (b) la conformité aux dispositions réglementaires du Code de Travail. A partir de ces recommandations, les niveaux d'éclairage moyens (voir tableau 6.7) proposés par l'Association Française d'Eclairage (AFE) prennent en compte à la fois les *exigences visuelles de la tâche*, les *capacités visuelles* du travailleur et la *dépréciation* de l'installation (vieillesse des lampes, empoussièremment).

Mode d'éclairage	Emplacement ou type d'activité	Eclairage moyen (Lx)	
		à maintenir	en service
• Général	Minimum pour la circulation à l'extérieur	15	20
	Cours et entrepôts	25	30
	Parking, allées de communication	40	50
	Chargement, et déchargement, quais et docks	80	100
	Voies de circulation intérieure, escaliers magasins	125	150
• Général	Minimum pour la tâche visuelle	175	200
	Grosse mécanique, tâches industrielles, lecture et écriture	250	300
	Mécanique moyenne, imprimeries, dactylo, travaux de bureaux	425	500
	Bureaux de dessin, mécanographie	625	750
Mécanique fine, gravure, comparaison des couleurs, dessins difficiles	850	1 000	
• Général, localisé ou local	Mécanique de précision, électronique	1 250	1 500
• Localisé ou local	Tâches très difficiles dans l'industrie ou en laboratoire	> 1 750	> 2 000

Tableau 6.7 : Eclairages moyens à maintenir en fonction du type d'activité [4]

Ces valeurs peuvent être augmentées (x 1,5) si :

- les erreurs de perception peuvent avoir des conséquences dangereuses ou coûteuses,
- les facteurs de réflexion et les contrastes au niveau de la tâche visuelle sont faibles,
- le travail exige de la rapidité d'exécution,
- les tâches sont exécutées dans des locaux aveugles alors que l'éclairage recommandé est inférieur à 300 lux.

L'éclairage de n'importe quelle surface n'est jamais constant dans le temps ; il diminue avec la baisse de puissance consécutive au vieillissement des lampes, le dépôt de poussière et autres salissures sur les lampes, luminaires et surfaces de la pièce. Dans cette perspective temporelle :

- les valeurs de *l'éclairage moyen en service* se réfèrent à l'éclairage moyen mesuré au milieu d'une période qui sépare la mise en service de l'installation (éclairage moyen initial) du premier entretien ou qui sépare deux périodes d'entretien consécutives,
- *l'éclairage moyen à maintenir* est l'éclairage moyen, à la limite de l'acceptable avant une intervention d'entretien (nettoyage des luminaires, remplacement des lampes),
- *l'éclairage moyen initial* est l'éclairage moyen d'une l'installation neuve; il est égal à :
 - 1,5 fois l'éclairage à maintenir pour les locaux à faible empoussièremment,

- 1,75 fois l'éclairage à maintenir pour les locaux à empoussièremment moyen,
- 2 fois l'éclairage à maintenir pour les locaux à empoussièremment élevé.

4.1. Uniformité spatiale

4.1.1. Facteur d'uniformité

D'un point de vue pratique, l'éclairage obtenu avec n'importe quel système d'éclairage n'est jamais uniforme sur toute la surface de référence. Pour caractériser le degré d'uniformité de la lumière sur une surface, deux niveaux d'éclairage sont pris en considération: *l'éclairage moyen* (E_{moy}) sur la surface de référence et *l'éclairage minimal* (E_{min}) relevé aux points pertinents de la surface de référence. Un *facteur d'uniformité* (E_{min}/E_{moy}) a été proposé pour évaluer l'uniformité de l'éclairage dans la zone de travail résultant de l'association de l'éclairage localisé et l'éclairage général. Ce rapport - E_{min}/E_{moy} - ne doit pas être inférieur à 0,8.

Le facteur d'uniformité dépend :

- du rapport entre l'espacement des luminaires et la hauteur utile,
- de la répartition photométrique des luminaires,
- des facteurs de réflexion des parois.

4.1.2. Rapports d'éclairage

Le rapport d'éclairage entre les *zones de circulation* et les *zones de travail* attenantes doit être au moins de 1/5 ; le niveau d'éclairage moyen des zones de circulation ne doit pas être inférieur à 125 lux. Le rapport d'éclairage de *deux locaux contigus* doit être compris entre 1 et 5.

4.1.3. Distribution de l'éclairage sur les parois du local

En ce qui concerne la distribution de *l'éclairage sur les murs*, les conditions satisfaisantes sont exprimées dans la formule : $0,5 < E3/E4 < 0,8$, où **E3** est l'éclairage moyen sur l'ensemble des murs et **E4** est l'éclairage moyen sur le plan utile. Il est également recommandé que le rapport des éclairages sur le plafond (**E1**) et sur le plan utile (**E4**) soit $0,3 \leq E1/E4 \leq 0,9$.

ECLAIRAGE QUALITATIF

Durant le premier centenaire d'application de l'éclairagisme à l'ambiance de travail, la principale préoccupation était de développer les sources lumineuses, les moyens d'éclairer la zone de travail et la tâche en particulier. Ceci s'est traduit par la recherche des moyens d'évaluation et de calcul du *niveau d'éclairement* nécessaire à la visibilité de la tâche [94]. Toutefois, les conditions d'un bon éclairage ne se limitent aux seuls aspects quantitatifs ; elles concernent également les facteurs qui influencent la *qualité visuelle* de l'ambiance dans laquelle se déroulent les diverses activités professionnelles. Ainsi, un bon éclairage doit créer un environnement lumineux confortable et agréable pour mettre en valeur certains aspects de la réalité ; il doit assurer un degré élevé de visibilité des tâches et des objets et faciliter l'accomplissement des tâches pendant de longues périodes de travail.

1. Direction de la lumière

Autrefois, la lumière artificielle provenait essentiellement d'une source unique disposée au centre de la pièce ; elle projetait l'ombre de la tête, des mains ou des outils sur la tâche. Actuellement, les ateliers et les bureaux sont éclairés par plusieurs sources de lumière ; celle-ci arrive alors sur la tâche visuelle sous plusieurs incidences. Les ombres gênantes sont ainsi facilement évitées.

Cependant, le problème de la répartition de la lumière dans l'environnement de travail ne se réduit pas aux seuls aspects évoqués ci-dessus car la distribution spatiale de la lumière et plus particulièrement l'orientation de l'éclairage vers les différentes parties de la zone de travail influence en premier lieu la visibilité de la tâche. En effet, la perception des objets tri-dimensionnels et des structures (objets en métal ou textiles) nécessite un éclairage orienté dans une direction prédominante ; les ombres peuvent alors faciliter ou masquer la vision des détails. Dans le cas des surfaces courbes ou à plusieurs facettes, un éclairage orienté

permet de mettre en évidence la forme des objets et des détails. Cet éclairage dirigé vers la tâche peut être également utile lorsqu'il s'agit de manipuler de petits objets. Ainsi, la lumière réfléchie par la surface d'une aiguille est parfois mieux perçue que l'aiguille elle-même ; la détection de rayures sur une surface polie peut être facilitée par une lumière qui éclaire la surface sous une incidence rasante, pour qu'une des lèvres de la rayure soit éclairée presque perpendiculairement et présente une luminance plus élevée que le pourtour immédiat.

Dans des *tâches d'inspection*, une orientation convenable de la lumière peut faciliter la reconnaissance de détails, la mise en évidence de défauts ou d'une texture. En revanche, dans le *contrôle* visuel de circuits électriques ou électroniques, si la lumière est dirigée vers la tâche, elle est réfléchie par les nombreux points de soudure et provoque un éblouissement qui rend l'inspection impossible. Dans ce cas, il est préférable que la lumière soit uniformément répartie sur le plan de travail.

En conclusion, la lumière permet à l'opérateur de voir, mais la lumière mal placée ou mal orientée peut constituer à la fois une source d'inconfort et d'affaiblissement des capacités visuelles. Afin de prévenir les risques d'une mauvaise répartition spatiale de la lumière, *il convient donc de connaître la tâche* et de contrôler l'effet "directionnel" de l'éclairage [24].

2. Aspects qualitatifs de l'éclairage

La qualité visuelle d'un environnement lumineux dépend : (a) du *niveau de l'éclairement* sur le plan de travail (voir fiche n° 6) et de la *répartition spatiale* de la lumière, (b) des *contrastes de luminance* dans le champ visuel de l'opérateur et de l'*absence d'éblouissement* (voir fiche n° 8) et (c) de la *couleur* de la lumière (spectre de la source) et de celle des surfaces éclairées.

2.1. Distribution spatiale de la lumière

Autrefois, un "bon éclairage" était spécifié en termes d'éclairage dans un plan horizontal afin de satisfaire surtout un critère d'uniformité. Dans cette optique, les variations d'éclairage mesurées point par point ne devaient pas dépasser $\approx 1/6$ de la valeur moyenne. Cependant, une installation qui ne fournit qu'un éclairage horizontal uniforme est loin d'être satisfaisante. Actuellement, la conception d'un bon éclairage est plus large, plus flexible et les aspects qualitatifs sont davantage pris en considération. Sans négliger le maintien d'une certaine uniformité de l'éclairage horizontal sur le plan de travail, *la qualité d'un système d'éclairage dépend surtout de la répartition spatiale de la lumière* ; en effet, la *distribution des luminances* qui en résulte influence de façon déterminante la visibilité de la tâche, le confort visuel et les capacités visuelles de l'opérateur. Ainsi, les luminances des zones qui entourent un objet ou une tâche peuvent avoir des conséquences variées sur les fonctions visuelles selon les zones concernées, leur localisation par rapport à la ligne de vision et leurs luminances réelles par rapport à la luminance de la tâche. Afin de comprendre ces relations, il convient de rappeler que l'adaptation de l'oeil à l'obscurité ou à la lumière concerne non seulement les transitions brusques d'une condition à une autre, mais aussi le maintien d'un état relativement stable. En effet, pour une certaine distribution des luminances dans le champ visuel, l'oeil s'adapte à la valeur **moyenne** des luminances des zones rattachées au point de vision pertinent. Exprimée en termes de luminance, cette valeur moyenne est appelée **luminance d'adaptation**. Cette notion est importante car de nombreuses fonctions visuelles sensorielles et motrices sont influencées par la luminance d'adaptation. Ainsi, une augmentation du niveau de luminance d'adaptation a un effet favorable sur l'acuité visuelle et la sensibilité au contraste ; cet effet est surtout notable pour des valeurs proches du seuil de visibilité.

Observations

Les effets visuels d'un objet dépendent à la fois du niveau moyen des luminances dans le champ visuel (*luminance d'adaptation*), de la luminance de la cible et du rapport des luminances entre objet et fond.

2.2. Rapports de luminance

L'oeil est sensible aux différences de luminance entre les surfaces et les objets présents dans le champ visuel. La visibilité d'un objet ou d'un détail dépend du rapport de la luminance de l'objet à celle du fond sur lequel il se détache. La capacité à distinguer les détails, la qualité et la rapidité de la perception visuelle sont également influencées par les rapports de luminance entre les différentes zones concentriques du champ visuel : tâche visuelle, environnement proche autour de la tâche visuelle et périphérie. Un écart trop grand entre les luminances de ces zones peut provoquer une diminution du confort visuel, de la visibilité de la tâche ou des deux. Ainsi, un rapport trop élevé entre la luminance de la tâche et celle d'une fenêtre peut diminuer la capacité à voir la tâche si le regard de l'opérateur se déplace de la tâche vers la fenêtre et de celle-ci vers la tâche. De même, lorsque la luminance d'une des surfaces, de la tâche ou de l'environnement, est trop élevée, elle peut provoquer un **éblouissement gênant**. Celui-ci peut être provoqué directement par la source lumineuse ou indirectement, *par réflexion*. Lorsque les réflexions sont proches de la ligne de vision, elles peuvent également provoquer un **éblouissement perturbateur** (voir fiche n° 8).

2.2.1. Exigences visuelles

La répartition des luminances dans le champ visuel doit assurer à la fois une luminance plus élevée au centre de la rétine qu'à la périphérie et maintenir une certaine homogénéité des luminances dans le champ visuel. La première condition implique un rapport de luminance **élevé** entre *détail* et *fond* au niveau de la tâche afin de faciliter la perception des détails. La deuxième condition implique un rapport de luminance **faible** entre la tâche et les zones qui l'entourent afin d'éviter l'éblouissement. Afin de concilier ces exigences contradictoires, il est recommandé de ne pas dépasser un rapport de 3 à 1 entre la luminance de la tâche et celle de l'environnement proche et de 10 à 1 entre la tâche et les zones plus éloignées. Toutefois, des ajustements peuvent être nécessaires selon les tâches et les emplacements (travail de bureau avec ou sans écran de

visualisation, assemblage électronique, magasins, entrepôts...).

2.2.2. Détermination du contraste

Le terme *contraste* se réfère au rapport entre la luminance d'un objet et le fond sur lequel il se détache¹. Le contraste (C) entre la luminance d'un objet ou d'un détail (L_O) et la luminance du fond (L_F) peut être calculé selon la formule $C=L_O-L_F/L_F$. Lorsque les luminances L_O et L_F sont très différentes, $C=L_O/L_F$.

En ce qui concerne la tâche visuelle, le contraste est défini en termes de différence relative de luminance entre un détail et le fond sur lequel il est vu. Lorsqu'il s'agit d'une tâche ou d'une surface mate et plate, les effets de l'éclairage sur la luminance et les contrastes de luminance dépendent uniquement du *niveau d'éclairement* ; une augmentation de l'éclairement améliore la sensibilité au contraste du système visuel et partant, la visibilité de la tâche. Pour un niveau d'éclairement donné, les luminances sont proportionnelles aux facteurs de réflexion de ces surfaces ; le contraste d'une tâche mate est alors déterminé par les facteurs de réflexion du détail et du fond. En revanche, pour des tâches dont les surfaces ne sont pas parfaitement mates (en pratique, c'est le cas le plus fréquent), la luminance et les contrastes de luminance sont significativement influencés par la *répartition spatiale* de la lumière. Ainsi, lorsqu'il s'agit de surfaces plus ou moins polies, les luminances du détail et du fond de la tâche dépendent de l'éclairement de la tâche et des *facteurs de réflexion* (voir fiche n° 8) de ces surfaces. Etant donné que les facteurs de réflexion sont rarement uniformes dans toutes les directions, le contraste peut être différent lorsque la position de la source (la direction de l'éclairage vers la tâche) ou celle de l'opérateur varie.

2.2.3. Rendu du contraste

Pour un environnement lumineux donné, afin de préciser le contraste d'une tâche ayant une localisation donnée et vue sous

¹ Le *contraste* exprime une différence d'apparence perceptible entre deux parties du champ visuel vues simultanément ou successivement.

un certain angle, la CIE a introduit le terme de Facteur de Rendu du Contraste (CRF)²:

- CRF >1 pour les systèmes d'éclairage qui dirigent la lumière latéralement vers une tâche brillante,
- CRF = 1 pour un système d'éclairage totalement indirect,
- CRF < 1 pour un système d'éclairage conventionnel [24].

Observation

Le CRF peut être utilisé pour déterminer l'efficacité des méthodes utilisées pour éviter la réduction du contraste lorsque les surfaces sont brillantes ; il apporte également une information utile lors de l'évaluation d'un système d'éclairage.

3. Couleur

Les couleurs peuvent contribuer à la qualité de l'éclairage en rendant la tâche et l'environnement plus agréables. Le terme *couleur* se réfère à la fois à l'*objet* coloré (couleur perçue comme appartenant à un objet), à la couleur de la *source* de lumière (chromaticité, teinte apparente de la source) et au *rendu de couleur* (propriété d'une source de lumière à restituer fidèlement les couleurs des objets qu'elle éclaire). Un *indice de rendu des couleurs* permet d'évaluer la capacité de l'éclairage à conférer aux objets éclairés leurs couleurs "naturelles".

3.1. Chromaticité d'une source

La *chromaticité* d'une source concerne l'attribut d'un stimulus coloré tel qu'il est défini par ses coordonnées trichromatiques ou sa température de couleur ; la chromaticité dépend du spectre de la lumière émise par cette source.

3.2. Température de couleur

La *couleur apparente de la lumière* fournie par les lampes est définie par leur

² Facteur de rendu du contraste (*Contrast Rendering Factor - CRF*) : rapport entre le contraste d'une tâche visuelle dans un environnement lumineux donné et le contraste dans un environnement de référence (sphère à luminance uniforme).

*température de couleur*³(Tc). Selon leur température de couleur, les couleurs émises par différentes sources ont été classées en teintes *chaudes* (≤ 3300 K), *intermédiaires* (entre 3300 et 5000 K) et *froides* (> 5000 K). Plus la Tc est basse, plus la lumière est riche en ondes associées à la couleur rouge, plus la Tc est élevée, plus la lumière est riche en ondes associées à la couleur bleue. Dans la composition spectrale d'une source de lumière, certaines longueurs d'ondes sont dominantes. Ainsi, la lumière émise par une lampe à incandescence apparaît blanche à dominante jaune-orange et par un tube fluorescent blanc-bleuté. Sur le plan subjectif, les couleurs chaudes sont stimulantes, les couleurs froides sont apaisantes, les zones d'ombre sont relaxantes. Il a été démontré que pour de faibles niveaux d'éclairage, les sources de lumière "chaudes" (de basse Tc) sont évaluées comme acceptables tandis que pour des niveaux élevés d'éclairage, les sources "froides" (de haute Tc) sont considérées comme acceptables. En pratique, une ambiance lumineuse confortable peut être conçue à partir du diagramme de Kruthoff (figure 7.1) qui établit une relation entre la température de couleur et le niveau d'éclairage.

3.3. Rendu des couleurs

Le *rendu des couleurs* concerne la capacité d'une source de lumière, avec sa chromaticité particulière, à rendre aux objets qu'elle éclaire, leurs couleurs habituelles. L'*indice de rendu des couleurs* (Ra ou IRC) permet d'évaluer le degré de correspondance entre la couleur psychophysique d'un objet (couleur apparente) éclairé par une source de lumière et celle du même objet éclairé par une source lumineuse de référence de même température de couleur (lampe à filament de tungstène). Sur une échelle de 1 à 100, plus l'IRC est élevé, plus une source donnée restitue fidèlement la couleur de l'objet éclairé. Ainsi, un IRC est considéré comme "bon" à partir de 80 et "excellent" à partir de 90 ; un IRC de 50 à 80 est estimé comme "moyen" et comme "mauvais" s'il est

³ La température de couleur d'une source de lumière est la température à laquelle il faut porter un corps noir pour qu'il émette un rayonnement ayant la même chromaticité que celui de la source considérée. Unité : kelvin (K).

inférieur à 50. Un bon rendu de couleur implique une similarité d'apparence avec celle obtenue dans une condition acceptable, telle que la lumière de jour.

3.4. Contraste chromatique

Les objets qui se trouvent dans le champ de vision peuvent avoir la même luminance de fond, mais des couleurs différentes. Le contraste des couleurs peut alors contribuer à l'amélioration de la visibilité notamment lorsque le contraste des luminances est faible. Toutefois, des contrastes chromatiques qui permettent un maximum de visibilité ne représentent pas plus de 20 % des contrastes obtenus par différence de luminance. En revanche, l'évaluation subjective de l'environnement peut être favorablement influencée par une disposition judicieuse des couleurs. Ainsi, deux couleurs adjacentes de tonalité voisine sont jugées harmonieuses, un contraste chromatique objet-fond met en évidence la couleur de l'objet [59].

3.5. Résumé

La qualité visuelle d'un environnement lumineux dépend de plusieurs conditions, à savoir :

- le niveau de l'éclairage sur le plan de travail
- la répartition spatiale de la lumière
- les contrastes de luminance
- la couleur
 - des sources lumineuses
 - des surfaces éclairées

Observations

Dans la conception d'un système d'éclairage, il convient également de prendre en compte les *zones de transition* (voies d'accès, couloirs, éclairage naturel) qui nécessitent un temps d'adaptation, d'éviter l'*éblouissement direct* provoqué par des éclairages verticaux et les *réflexions* de voile (voir fiche n° 8).

De ce qui précède, il ressort que les composantes quantitatives et qualitatives de l'éclairage sont complémentaires ; il ne s'agit donc pas de les opposer mais de les combiner lors de la conception ou de l'évaluation d'un système d'éclairage.

4. Aspects quantitatifs et qualitatifs de la conception de l'éclairage

Pour les ambiances dont la fonction principale de l'éclairage est de fournir un éclairage nécessaire à l'exécution rapide

et précise de tâches visuelles, les paramètres quantitatifs et qualitatifs de l'éclairage doivent toujours être rapportés aux *exigences visuelles de la tâche*. Dans cette approche, les principaux facteurs à prendre en compte concernent la *tâche*, la *zone* dans laquelle la tâche est effectuée et le choix et la disposition des *sources lumineuses* [94].

4.1. Tâche visuelle

Il convient de préciser d'abord la façon dont la tâche doit être mise en évidence par l'éclairage, *diffus* ou *orienté*, pour accentuer les ombres, pour obtenir un effet tri-dimensionnel ou renforcer les couleurs. Ainsi, dans un bureau, la tâche visuelle typique est de lire sur une table mais la même tâche de lecture peut être exécutée dans une usine ou dans un magasin. Les différentes techniques d'éclairage (éclairage industriel, éclairage de magasins, de bureaux, etc.) apportent des solutions adaptées aux tâches visuelles exécutées par les personnes qui travaillent dans ces espaces. Ensuite, il s'agit de déterminer les *luminances* à fournir et de vérifier la vulnérabilité de la tâche aux *réflexions* de voile.

4.2. Zone dans laquelle s'effectue la tâche visuelle

Afin d'assurer la visibilité de la tâche et le confort visuel de l'opérateur, il est nécessaire de déterminer à la fois les *dimensions* de la zone de travail, les facteurs de *réflexion* des surfaces (sol, murs) et les rapports des *luminances*. Il convient également de vérifier la *qualité* des surfaces (polie ou mate) afin de prévenir le risque d'éblouissement par réflexion.

4.3. Sélection et disposition des sources lumineuses

Pour choisir le *niveau* et la *distribution* des sources d'éclairage, il faut d'abord déterminer le *type d'éclairage* nécessaire pour éclairer les différentes zones du champ visuel afin de minimiser les efforts d'adaptation du système visuel dans les zones de transition et d'éviter l'éblouissement par réflexion (voir fiche n° 5). Ensuite, il faut choisir le *niveau d'éclairage* adéquat (voir fiche n° 6). Enfin, il convient de préciser la *disposition* des luminaires et la *qualité spectrale*

adéquate à la mise en évidence de la tâche et à la reconnaissance des couleurs.

Dans cette perspective, une *conception* de l'éclairage peut être développée à partir de la tâche visuelle éclairée et d'une hiérarchie ordonnée de luminances qui détermine ce qui va être (ou/et ne pas être) vu (et compris) tout au long du travail. Cette approche est également valable lors de l'*évaluation* d'un système d'éclairage car dans ce cas, il s'agit de déterminer le degré d'adaptation d'un environnement lumineux (en termes de quantité et qualité de l'éclairage) aux exigences visuelles de la tâche. Dans ce contexte, le terme *exigences visuelles* se réfère à la fois aux facteurs physiques qui influencent la visibilité de la tâche et à la performance visuelle (rapidité et de précision) et plus particulièrement à la capacité de l'opérateur d'effectuer la tâche en conditions de confort visuel. Des adaptations et des corrections selon l'*âge* des opérateurs s'avèrent souvent nécessaires.

4.3.1. Disposition des sources d'éclairage

Assez souvent, des tâches variées sont exécutées à différents emplacements ; il faut donc assurer un éclairage horizontal adéquat pour tous les postes de travail. Dans les situations où l'aménagement d'un éclairage relativement uniforme permet d'accomplir la tâche en conditions de confort visuel, certaines indications peuvent aider à préciser la *disposition des luminaires*. Elles concernent les distances entre les luminaires ou entre les murs et les luminaires, l'intensité de la lumière fournie par les différents luminaires, leur emplacement dans la pièce et le facteur de réflexion des surfaces de la pièce. En ce qui concerne l'éclairage direct, semi-direct et général diffus, le facteur principal à prendre en considération est la hauteur des luminaires par rapport au plan de travail ; pour l'éclairage semi-indirect et indirect, c'est la hauteur des luminaires par rapport au plafond [94].

4.3.2. Avantages et limites des systèmes d'éclairage

4.3.2.1. Systèmes d'éclairage uniforme

Ces systèmes d'éclairage général favorisent la perception dans les tâches de lecture ou

manuelles. De plus, ils permettent de réarranger facilement le mobilier et les postes de travail avec une grande flexibilité et sans intervenir sur l'éclairage de la pièce. En revanche, l'éclairage diffus et uniforme qui en résulte est peu stimulant du point de vue psychologique, la tâche devient ennuyeuse ; il est alors utile d'introduire un degré de variabilité dans la distribution de la lumière pour maintenir l'attention (voir ci-dessous). La monotonie peut également être atténuée par une utilisation adéquate des couleurs

4.3.2.2. Systèmes d'éclairage non uniforme

Ce type d'éclairage est beaucoup plus stimulant que le précédent car une distribution adéquate de la lumière peut modifier le comportement de l'utilisateur en influençant l'attention sélective ou en modifiant le contenu informationnel des objets présents dans le champ visuel. Ainsi,

les spots lumineux ou l'éclairage d'étagères attirent l'attention sur certaines zones de l'environnement, l'éclairage des murs ou des coins de la pièce influencent les impressions générales sur la taille ou la forme de la pièce, la distribution des sources d'éclairage et la couleur peuvent renforcer une impression de relaxation. Toutefois, le risque de déséquilibre des luminances dans le champ visuel de travail est plus grand qu'avec les systèmes d'éclairage uniforme.

En résumé, dans le processus de conception d'un système d'éclairage, les principaux facteurs d'éclairage à considérer sont : (a) la sélection du niveau d'éclairage en fonction de la tâche et de l'âge de l'opérateur ; (b) la détermination des rapports de luminance afin d'assurer le confort visuel et d'éviter l'éblouissement et les réflexions de voile ; (c) l'utilisation judicieuse des couleurs et des ombres.

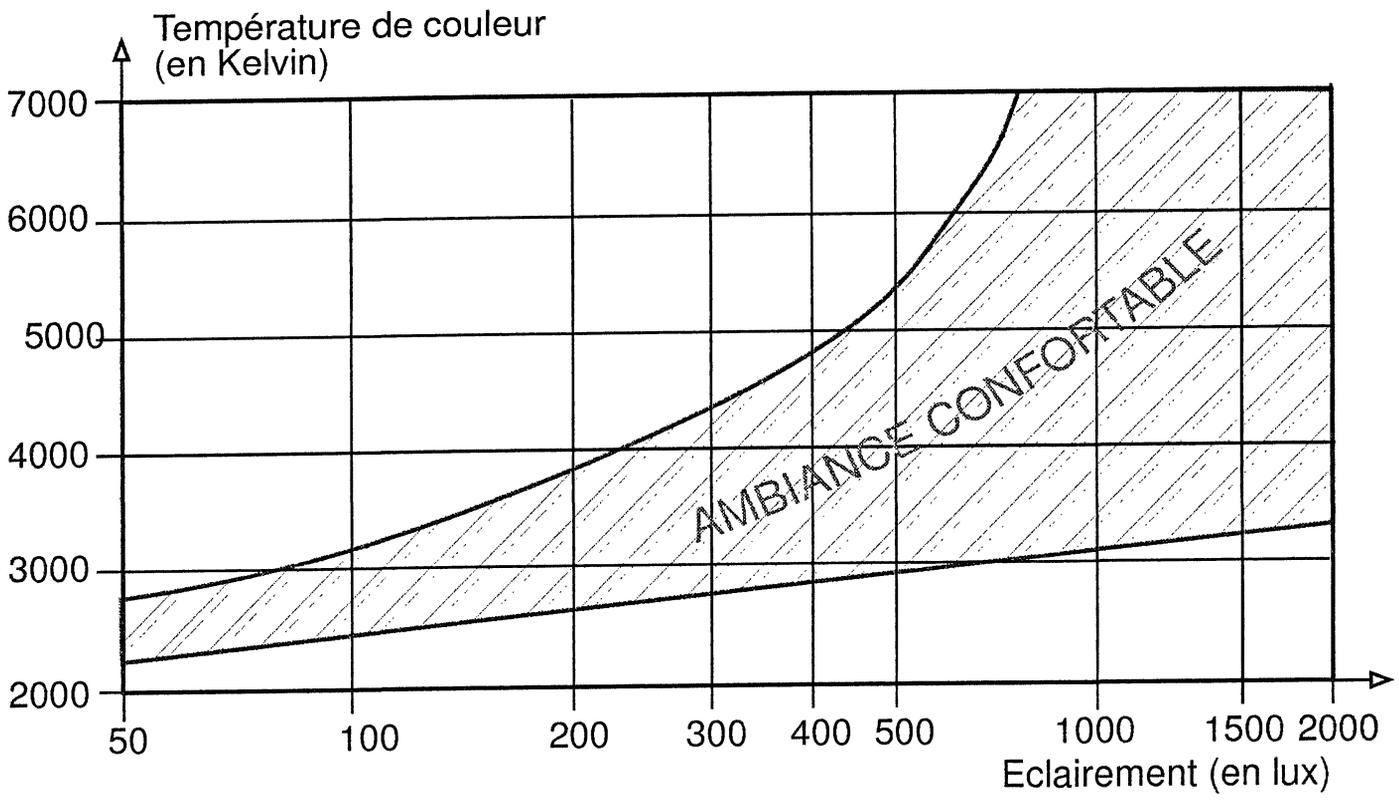


Figure 7.1. Diagramme de Kruithoff

EBLOUISSEMENT ET CONFORT VISUEL

Considéré comme l'un des principaux facteurs d'inconfort visuel, l'éblouissement¹ constitue l'objet de nombreuses recherches visant d'une part à préciser les facteurs déterminants et les mécanismes sous-jacents et d'autre part à évaluer, contrôler et prévenir l'éblouissement dans l'environnement de travail.

1. Phénomène d'éblouissement

Un excès de luminance dans le champ visuel tel que le passage brusque de l'obscurité à la lumière, l'apparition de projecteurs ou phares, de points lumineux apparaissant dans l'espace visuel, provoquent *l'éblouissement*. Ce phénomène se caractérise par une sensation de gêne oculaire et des difficultés à distinguer l'objet examiné.

1.1. Types d'éblouissements

Du point de vue de ses effets sur la vision, l'éblouissement peut être *inconfortable* lorsqu'il est incommode et gênant mais les performances visuelles ne sont pas affectées. L'éblouissement est qualifié de *perturbateur* (ou d'*incapacité* - A.F.E.) lorsqu'il réduit la visibilité de la tâche ou la capacité visuelle de l'observateur sans être forcément gênant. L'éblouissement peut être à la fois inconfortable et perturbateur, mais les deux phénomènes sont distincts [24].

Observations

En pratique, la distinction entre ces deux types d'éblouissement n'est pas importante car les mêmes paramètres sont impliqués dans les deux cas et les mesures prises pour réduire l'éblouissement

d'inconfort tendent à réduire également l'éblouissement perturbateur [97, 4].

Du point de vue de la source d'éblouissement, ce dernier peut être *direct* quand il est provoqué par la luminance propre excessive des sources lumineuses (lampes, luminaires, fenêtres) et *indirect* ou *par réflexion* (fig. 8.1.) quand il est provoqué par les luminances réfléchies par des surfaces qui se comportent comme un miroir (dessus de table, parties brillantes des machines, écran de visualisation). Par ailleurs, les réflexions peuvent avoir un caractère *spéculaire* ("en miroir") lorsque la lumière est réfléchie par des surfaces polies (écran de visualisation, papier glacé...) ou *diffus*, si les surfaces qui réfléchissent la lumière sont mates.

1.2. Facteurs déterminants et favorisants

A l'extérieur, la nuit, l'éblouissement est généralement provoqué par les phares des véhicules roulant en sens inverse. A l'intérieur, la cause la plus fréquente d'éblouissement est une protection insuffisante des sources de lumière artificielle (lampes et luminaires) et naturelle, c'est-à-dire la partie du ciel et de l'immeuble éclairé par le soleil qui sont vus par les fenêtres. Leur luminance élevée provoque l'éblouissement *directement* ou *indirectement, par réflexion*.

Observations

Les progrès des techniques de fabrication des lampes ont permis une augmentation du rendement lumineux (davantage de lumens par watt) laquelle a entraîné une augmentation de la luminance de la surface des lampes. Ainsi, la luminance d'un tube fluorescent de 40 W est passée de 3000 cd.m⁻² à 5000 ou même à 8000 cd.m⁻². Il est certain que, sans une protection adéquate, ils constituent une source d'éblouissement.

En ce qui concerne l'éblouissement inconfortable provoqué par une *source unique* (lampe ou luminaire), la gêne est d'autant plus forte que :

- la luminance de la source et de son arrière-plan (plafond, par exemple) est plus élevée,

¹ Pour la C.I.E. le terme *éblouissement* se réfère aux conditions visuelles dans lesquelles le sujet éprouve soit une gêne, soit une réduction de l'aptitude à distinguer les objets, soit les deux par suite d'une répartition inadéquate des luminances dans le champ visuel ou d'un contraste excessif dans l'espace et dans le temps [25].

- les dimensions apparentes de la source sont plus grandes,
- le fond sur lequel la source se détache est plus sombre,
- l'angle compris entre la direction considérée et l'horizontale est plus faible.

L'éblouissement perturbateur apparaît lorsque les sources de lumière se reflètent d'une façon spéculaire ou semi-spéculaire dans les tâches visuelles ; le contraste et donc la visibilité et la performance visuelle peuvent diminuer notablement. La gamme, très variée, des effets de ce type d'éblouissement s'étend des réflexions d'un filament incandescent sur une surface métallique polie qui produisent un effet visuel gênant et perturbateur aux réflexions d'une grande aire lumineuse sur la surface d'une revue imprimée sur papier mat [94].

1.2.1. Facteurs qui contribuent à la diminution du contraste

Lorsque l'image d'un luminaire ou d'une autre source de lumière se reflète dans la tâche, le contraste entre détail et fond diminue. Cet effet est appelé *voile de réflexion* ou *réflexions voilantes* [4] parce que les réflexions de la source apparaissent comme une voile sur la tâche. La diminution du contraste due aux réflexions de voile résulte de l'intervention de plusieurs facteurs dont les principaux sont les caractéristiques physiques de la tâche, la position de l'opérateur et la qualité de l'éclairage [94].

1.2.1.1. Tâche visuelle

Les réflexions provenant du détail ou du fond de la tâche ont un caractère plus ou moins spéculaire ou diffus en fonction des matériaux constitutifs et de la position, horizontale ou inclinée du plan de travail.

1.2.1.2. Position de l'opérateur

L'effet perturbateur des réflexions de voile dépend également de la position de l'opérateur par rapport à la tâche et aux sources de lumière. La zone contenant la source responsable des réflexions de voile est appelée "zone gênante". Lorsque la position de l'oeil est telle que les rayons lumineux provenant d'une zone gênante sont reflétés vers l'oeil, des réflexions de

voile apparaissent ; l'angle des réflexions est considéré comme angle de vision. Plus l'angle de vision augmente, plus les effets de miroir d'une tâche réfléchissante augmentent. Afin d'éviter les réflexions il convient alors de réduire l'angle de vision. Ensuite, l'importance de l'effet des réflexions de voile dépend de la position et de l'orientation du travailleur dans la pièce (dos ou face au mur, près d'une fenêtre, face aux fenêtres, etc.). Ainsi, lorsque l'opérateur est proche du mur et regarde vers le centre de la pièce, toute la zone du plafond constitue une "zone gênante" potentielle ; lorsqu'il est au centre de la pièce, le plafond peut constituer une zone gênante en fonction de l'angle de vision ; lorsqu'il est face au mur, les réflexions sont minimales mais, pour des raisons psychologiques, cette position n'est pas recommandée [94].

1.2.1.3. Système d'éclairage

La plus mauvaise condition de visibilité est celle où une source lumineuse intense et ponctuelle est orientée vers la tâche. Une autre situation inconfortable se présente lorsque les ombres interfèrent avec l'activité (écriture, par exemple). Cependant, dans cette condition, l'opérateur peut éviter les réflexions de voile en inclinant le plan de la tâche. Lorsqu'un dôme de lumière éclaire la tâche verticalement, les réflexions de voile peuvent être réduites mais pas éliminées car une aire lumineuse peut persister dans la "zone gênante". Entre ces deux conditions, il existe des situations où les luminaires, disposés en rangées au plafond, distribuent la lumière sur un plan horizontal selon la nature de l'équipement (diffusant, prismatique, paralumes, polarisant...).

1.3. Conséquences de l'éblouissement

1.3.1. Pour le confort visuel

L'éblouissement a un caractère transitoire. Toutefois, les sensations d'inconfort oculaire ressenties par les personnes qui travaillent dans les ateliers ou les bureaux s'accroissent dans le temps ; une distribution inadéquate de l'éclairage contribue alors à l'apparition de la *fatigue visuelle*.

1.3.2. Pour la visibilité

Les réflexions, diffuses ou spéculaires peuvent voiler la tâche (*voile de réflexion* ou *réflexions voilantes* [4]) et *diminuer le contraste* entre la cible et le fond et partant, réduit la visibilité de la tâche. Ainsi, une surface mate exposée à la lumière directe du soleil provoque un éblouissement perturbateur car elle a une luminance excessive, de l'ordre de 5 000 cd.m⁻². Les réflexions spéculaires peuvent provoquer non seulement un éblouissement perturbateur, mais également gênant.

1.3.3. Pour la charge de travail

Les réflexions spéculaires font apparaître deux images dans le champ visuel de l'opérateur, celle de l'objet à percevoir et l'image réfléchi par le plan de travail ou par l'écran d'un moniteur dans la direction du regard (image des luminaires ou des fenêtres, par exemple). Les muscles de l'accommodation sont alors soumis à une charge supplémentaire car ils mettent au point alternativement à deux distances différentes qui correspondent respectivement à la tâche (plus proche) et à l'image réfléchi (plus éloignée). A cette surcharge des muscles extrinsèques de l'oeil s'ajoute une charge mentale. En effet, les réflexions spéculaires qui apparaissent dans le champ visuel, attirent automatiquement le regard vers l'image réfléchi (*réflexe de fixation*). L'opérateur doit alors faire alors un effort volontaire pour ramener son regard, le maintenir et mettre au point sur l'objet à percevoir. De même, des lumières parasites attirent l'attention et le maintien du regard sur la cible exigent un effort compensatoire.

1.4. Mécanismes physiologiques

En fait, tous les types d'éblouissement s'expliquent par les imperfections du système visuel humain. L'éblouissement est provoqué par une luminance excessive par rapport à la *luminance d'adaptation* (voir fiche n° 7) ou non uniformément distribuée dans le champ visuel. Le mécanisme de l'éblouissement inconfortable est encore mal connu ; l'éblouissement perturbateur est dû à la dispersion intraoculaire de la lumière. En effet, des points lumineux dans l'espace visuel, des projecteurs ou phares dispersent la lumière incidente et réduisent

le contraste de l'image focalisée sur la rétine. Par ailleurs, lorsque la lumière provenant d'une surface brillante (fenêtre, source lumineuse, reflet brillant) se projette sur une partie de la rétine, la sensibilité diminue sur toute la rétine, y compris la fovéa. Il s'ensuit une diminution de l'acuité visuelle.

Observations

- L'éblouissement perturbateur modifie le contraste au niveau de la rétine ; lorsque l'image de l'objet à percevoir et celle de la source parasite sont tous les deux dans l'axe de l'oeil, la lumière éblouissante occulte complètement l'objet.
- Des sources éblouissantes situées à proximité de l'axe de vision réduisent la visibilité des détails comme si une voile s'étalait sur l'image rétinienne. La luminance des réflexions diffuses peut voiler la tâche et réduire le contraste entre l'objet qui doit être perçu et le fond. Ce phénomène, appelé *effet de voile* ou *luminance de voile*² perturbe la visibilité de la tâche.
- Les deux types d'éblouissement - inconfortable et perturbateur - coexistent assez souvent.
- L'incapacité visuelle, la défaillance des fonctions visuelles (acuité, champ visuel, vision des couleurs et du relief) provoquée par l'éblouissement est suivie d'un temps de récupération plus ou moins long.
- La diminution de la résistance à l'éblouissement (augmentation du temps de récupération) peut constituer une contre-indication dans les transports routiers et dans d'autres professions (acteurs, pompiers, forgerons...) dont la tâche exige l'exposition à des sources lumineuses puissantes.

2. Evaluation de l'éblouissement gênant

A partir d'expérimentations sur la gêne produite par les luminances et leur distribution dans le champ visuel, diverses formules ont été proposées pour évaluer l'éblouissement provoqué par des sources uniques. Ces formules ont été ultérieurement testées en situations réelles pour différents systèmes d'éclairage. Les évaluations des éblouissements diffèrent entre elles ; en effet, les formules ou les diagrammes utilisés diffèrent selon qu'elles

² **Luminance de voile** (*veiling luminance*) - une luminance superposée à l'image rétinienne qui réduit son contraste. Cet effet de voile, produit par des sources ou zones à luminance élevée dans le champ visuel, se manifeste par une diminution de la performance visuelle et de la visibilité.

sont appliquées à plusieurs sources disposées en ligne ou à une source unique ; à ceci s'ajoutent les différences interindividuelles de sensibilité à l'éblouissement.

Observations.

- L'évaluation de l'éblouissement constitue une méthode indirecte d'estimation du confort visuel. Puisque l'éblouissement est le facteur principal d'inconfort, l'absence d'éblouissement est un indice de confort visuel.
- La notion de confort a une connotation subjective; par conséquent, tous les systèmes d'évaluation du confort, ou plutôt du manque de confort, ont une fiabilité limitée à cause des variations inter et intra-individuelles.

En pratique, la quantification de l'éblouissement a un caractère statistique. Certains systèmes utilisent des unités de valeur qui expriment l'intensité de la sensation de gêne qui va être ressentie avec une certaine probabilité (50 %, par exemple) : *Indice d'Eblouissement, Degré d'Eblouissement, Echelle d'Eblouissement*. Dans ces systèmes, diverses formules sont utilisées pour calculer une valeur représentant l'intensité de la gêne provoquée par une installation à partir de nombreux indices (facteurs de réflexion des surfaces, dimensions des locaux, distributions des luminances, dimensions et positions des luminaires, localisations des sujets, l'étendue du champ visuel).

D'autres systèmes utilisent des unités de valeur qui expriment la probabilité de confort visuel (voir § 2.1.) ou de gêne provoquée par l'éblouissement selon les exigences visuelles des tâches (voir § 2.2.). Cette dernière approche comporte également un contrôle de l'éblouissement sur la base des courbes de luminance (voir § 3.1.).

2.1. Système de la probabilité du confort visuel (Visual Comfort Probability - VCP).

Utilisé aux Etats-Unis et au Canada, ce système évalue la gêne provoquée par l'éblouissement en termes de pourcentage de la population qui considère que l'éblouissement provoqué par un système d'éclairage donné se situe à la limite entre confort et inconfort (*borderline between comfort and discomfort* - BCD). Lorsque la probabilité du confort visuel (VCP) est

égale ou supérieure à 70, l'éblouissement ne constitue pas un problème.

L'évaluation du confort avec VCP est basée sur la mesure des facteurs suivants qui influencent l'évaluation subjective de confort visuel :

- grandeur et forme du local,
- niveaux d'éclairage,
- facteurs de réflexion des surfaces du local,
- type et taille des luminaires, nombre et distribution des luminaires
- luminance maximale et distribution de la lumière,
- luminance du champ de vision total,
- position de l'observateur et ligne de vision,
- différences individuelles dans la sensibilité à l'éblouissement.

2.2. Système de la courbe de luminance

Utilisé en France, Autriche, Allemagne, etc., ce système exprime la gêne d'éblouissement en termes de *classes qualitatives* et propose des recommandations de différentes classes pour différents types de tâches et activités. Une classe qualitative (voir tableau 8.1) représente un certain degré d'éblouissement pour 50 % de la population testée. Il s'agit en fait d'un système de protection de l'éblouissement qui prend en compte les courbes de luminances pour deux types de luminaires (avec et sans émission latérale) disposés parallèlement ou perpendiculairement à la direction d'observation (voir 3.1.).

3. Contrôle de l'éblouissement

Pour contrôler et limiter l'éblouissement gênant direct provenant des luminaires et des lampes, il convient de contrôler la luminance des luminaires et des lampes dirigée vers les yeux des opérateurs et ses rapports avec les luminances provenant d'autres parties du champ visuel.

3.1. Contrôle de la luminance des luminaires et exigences visuelles des tâches

Le degré d'éblouissement gênant est fonction à la fois des luminances dans le

champ visuel et du type de tâche ou d'activité qui doit être effectuée dans un système d'éclairage donné. La sensation d'inconfort provoquée par des luminances inappropriées est en relation directe avec les sollicitations visuelles et attentionnelles.

Etant donné que l'intensité de l'éblouissement ressenti diffère selon l'activité, le degré de contrôle de la luminance des sources (ou classe d'exigence [4]) peut être classé par ordre décroissant (tableau 8.1).

Degré de contrôle de la luminance de la source	Type de tâche ou d'activité
I	Tâches visuelles très précises (assemblage électronique).
II	Tâches comportant des sollicitations visuelles très élevées (contrôle fin) ; tâches comportant des sollicitations visuelles modérées demandant une concentration importante et continue (travail de bureau, assemblage de composants de petite taille).
III	Tâches comportant des sollicitations visuelles et de concentration modérées (travail d'atelier en position assise), parfois avec un certain degré de mobilité du travailleur (assemblage de pièces de taille moyenne par un travailleur debout).
IV	Tâches comportant un faible niveau de sollicitations visuelles et de concentration, avec déplacements fréquents dans une aire restreinte (manutention de service autour d'une grosse machine, montage de pièces de dimensions importantes).
V	Locaux où les salariés ne sont pas assignés à un poste de travail, se déplacent fréquemment et où les exigences visuelles des tâches sont faibles.

Tableau 8.1 : Contrôle de la luminance de la source et exigences visuelles [24]

Pour limiter l'éblouissement, il existe des abaques (abaques de Bodmann et Söllner) qui indiquent, selon les directions d'observation, la luminance moyenne acceptable des luminaires [4]. Pour utiliser ces abaques, en plus de la luminance moyenne, il faut prendre en considération :

- la forme et la surface d'émission des luminaires et son orientation par rapport à l'observateur,
- la nature, la difficulté et la durée de la tâche visuelle,
- le niveau d'éclairage du local,
- les dimensions du local.

3.2. Contrôle de la luminance des lampes

Afin de limiter les fortes luminances qui provoquent l'éblouissement, il est nécessaire de concentrer l'émission lumineuse sur la surface à éclairer.

3.2.1. Protection

Un matériel opaque peut être utilisé pour intercepter la lumière émise par une lampe

dans la direction des yeux de l'opérateur. En pratique, ces "boucliers" constituent des éléments des luminaires ou font partie de la structure de l'immeuble. Le degré de protection est déterminé par l'angle de défilement³ entre l'horizontale et la première ligne de vision à partir de laquelle les lampes et les surfaces à luminance élevée ne sont pas visibles.

3.2.2. Déflecteurs

Un dispositif optique peut être interposé entre la lampe et les yeux du sujet pour dévier la lumière émise par la lampe ; les systèmes de réfraction (lentilles, prismes), miroirs ou réflecteurs (surfaces brillantes, etc.) en constituent des exemples.

3.2.3. Matériaux translucides

Des matériaux translucides transmettent la lumière de façon diffuse (globes, cylindres, et autres corps translucides qui enveloppent

³ Le *défilement* est une technique utilisée pour dissimuler à la vue directe les lampes et les surfaces à luminance élevée afin d'éviter l'éblouissement [25].

la lampe). Ils ne conviennent pas dans des situations où les exigences de contrôle de luminance sont élevées ; leur application est limitée aux intérieurs où la protection de l'éblouissement est subordonnée aux besoins d'un éclairage vertical (étalage, par exemple).

3.2.4. Eclairage indirect

Le contrôle de la luminance par l'éclairage indirect consiste à associer une protection de type bouclier dissimulant la lampe de la vision de tous côtés à une orientation particulière de la source de lumière. Celle-ci n'est pas dirigée vers les surfaces qui doivent être éclairées mais vers un élément du bâtiment (plafond ou frise) qui fonctionne alors comme une source secondaire de lumière. Par ailleurs, les différents systèmes de contrôle de luminance peuvent être combinés entre eux.

4. Prévention de l'éblouissement gênant

Afin d'éviter l'éblouissement plusieurs moyens ont été proposés :

- aménager les sources de lumière par rapport aux tables et machines ou inversement, disposer les machines et les tables de travail par rapport aux sources de lumière, y compris les fenêtres. Exemple : préférer une lumière latérale (lumière du jour par les fenêtres ou luminaires montés sur les côtés du poste de travail),
- régler la luminance des lampes et des luminaires,
- utiliser des luminaires ayant une grande surface de diffusion de la lumière,
- réduire la luminance des lampes dans les directions critiques,
- utiliser des matériaux ou des finitions mates et des couleurs claires pour le dessus des bureaux et des tables,
- combiner des luminaires ayant une composante dirigée vers le haut avec des facteurs de réflexion élevés du plafond, des murs et du sol,
- utiliser un système d'éclairage indirect.

4.1. Protection contre l'éblouissement gênant direct

L'éblouissement survient lorsque les lampes sont visibles directement à proximité

de la ligne de vision. Plus l'intensité de la lumière est élevée et la zone d'émission petite, plus grande doit être la zone angulaire au-dessus de laquelle il faut éviter la vue de la lampe. Ceci peut être obtenu soit en maintenant les lampes nues en dehors de cette zone (fig. 8.2) soit en les protégeant. Le tableau 8.2 présente les angles recommandés pour les zones d'exclusion, basées sur le seul critère d'éblouissement.

Type de lampe	Angle de la zone d'exclusion
- Lampes fluorescentes tubulaires (1)	10°
- Lampes à décharge avec revêtement fluorescent, lampes à incandescence avec verre dépoli	20°
- Lampes à décharge et incandescentes qui permettent une vue directe de l'arc du tube ou du filament	30°

(1) Le contrôle de l'angle pour la zone d'exclusion n'est exigé que si les tubes sont vus de côté

Tableau 8.2 : Angles de la zone d'exclusion [77]

La protection contre l'éblouissement préconisée par la CIE repose sur un système de *courbes de luminance* combiné à un système d'*angles de défilement*. Pratiquement, pour un observateur qui regarde horizontalement, l'éblouissement devient négligeable au-dessus de 45°. La limitation de la vue directe des lampes est caractérisée par l'*angle de défilement* (Φ_d) qui est évalué par rapport à la partie inférieure du corps lumineux. (L'angle complémentaire de Φ_d est appelé angle de protection - *shielding angle*).

Observations

Le critère de la "zone d'exclusion" (tableau 8.2) peut être appliqué aux luminaires individuels (y compris les lampes d'appoint) et aux luminaires disposés régulièrement ou irrégulièrement. Il ne peut pas être appliqué à l'éblouissement provoqué par de grandes sources, telles que les sources d'éclairage indirect, parce que toute leur surface peut être trop brillante. Afin d'éviter l'éblouissement dans ces conditions, l'éclairage moyen du plafond ne doit pas dépasser 2 250 lx.

4.2. Limitations de luminance pour les plafonds

Pour qu'un plafond soit lumineux et l'éclairage indirect uniforme, il est recommandé de limiter la luminance à 500 cd.m^{-2} dans toutes les directions et des angles supérieurs à 45° par rapport à la verticale.

4.3. Eclairage d'appoint

Lorsqu'il s'agit d'un éclairage d'appoint, il faut masquer les lampes à la vue directe et éliminer les "effets de bord", de façon que sous tous les angles de vue possibles, la luminance du luminaire soit inférieure à $5\,000 \text{ cd.m}^{-2}$.

5. Evitement ou réduction de l'éblouissement par réflexion

L'éblouissement par réflexion peut être évité ou réduit lorsque :

- le niveau d'éclairement des sources est faible et la lumière diffusée sur une grande surface,
- le mobilier, le sol, les parois et l'équipement sont mats,
- le niveau d'éclairement est élevé dans tout le local.

6. Facteurs de réflexion recommandés par l'A.F.E. [4] :

Au voisinage immédiat de la tâche visuelle, le facteur de réflexion doit être inférieur à celui de la tâche visuelle mais supérieur au 1/3 de cette valeur.

Le facteur de réflexion du plafond doit être aussi élevé que possible ($> 0,7$).

Le facteur de réflexion des murs doit se situer entre 0,3 et 0,7 et celui du sol entre 0,2 et 0,4.

Afin d'éviter une réduction du contraste provoquée par les *voiles des réflexions*, il est nécessaire de prendre en considération la *tâche*, l'orientation et la position du *travailleur* et l'*éclairage*. Ainsi, lors d'une tâche de lecture ou d'écriture, par exemple, le papier mat est préférable au papier glacé. En ce qui concerne le *système d'éclairage*, pour les petits locaux où la position des bureaux peut être déterminée, les luminaires ne doivent pas être positionnés en avant et au-dessus des bureaux. Les positions

préférées sont celles où les luminaires sont placés parallèlement à la direction du regard. Lorsque les bureaux sont disposés irrégulièrement, la solution extrême est d'utiliser un éclairage indirect.

7. Résumé

Les principales recommandations ergonomiques [cf. 92 ; 46] visant à réduire l'éblouissement dans l'ambiance de travail sont :

- Un éclairement uniforme, voire une augmentation de l'éclairement général de la pièce, est préférable à un éclairement irrégulier qui provoque des ombres marquées. Un éclairage diffus, réfléchi par les murs et le plafond, est plus confortable qu'un éclairage direct.
- Il est préférable de disposer plusieurs sources de puissances moindres qu'une seule source de forte puissance.
- La luminance des équipements lumineux ou d'autres sources d'éblouissement (fenêtres, lucarne) doit être inférieure à la luminance générale.
- Le rapport de luminance entre les surfaces adjacentes au centre du champ visuel ne doit dépasser 3:1. Ainsi, lorsque le papier blanc ("la tâche") a un facteur de réflexion de 75 %, celui de la surface de la table ("entourage") ne doit pas être inférieur à 25 %. Toutefois, le contraste entre les caractères imprimés et le papier doit être élevé ; la luminance de la tâche doit être plus élevée que celle de son entourage.
- Le rapport de luminance entre le centre du champ visuel et sa périphérie ne doit pas dépasser 10:1.
- Lorsque l'éclairement de la tâche visuelle est de 100 %, l'éclairement des murs doit être de 50 à 80 % et celui du plafond de 30 à 90 %. Le facteur de réflexion des murs doit être de 50 à 80 % et celui du plafond de minimum 60 % et du sol de 20 à 30 %.
- Les sources lumineuses ne doivent être visibles dans un angle de 30° au-dessus du niveau des yeux (fig. 8.2). Toutes les sources de lumière doivent être protégées [58].
- Les tubes fluorescents doivent être montés perpendiculairement à l'axe visuel mais les fenêtres doivent être parallèles à l'axe visuel.
- Les surfaces réfléchissantes proches du champ visuel central doivent être évitées.

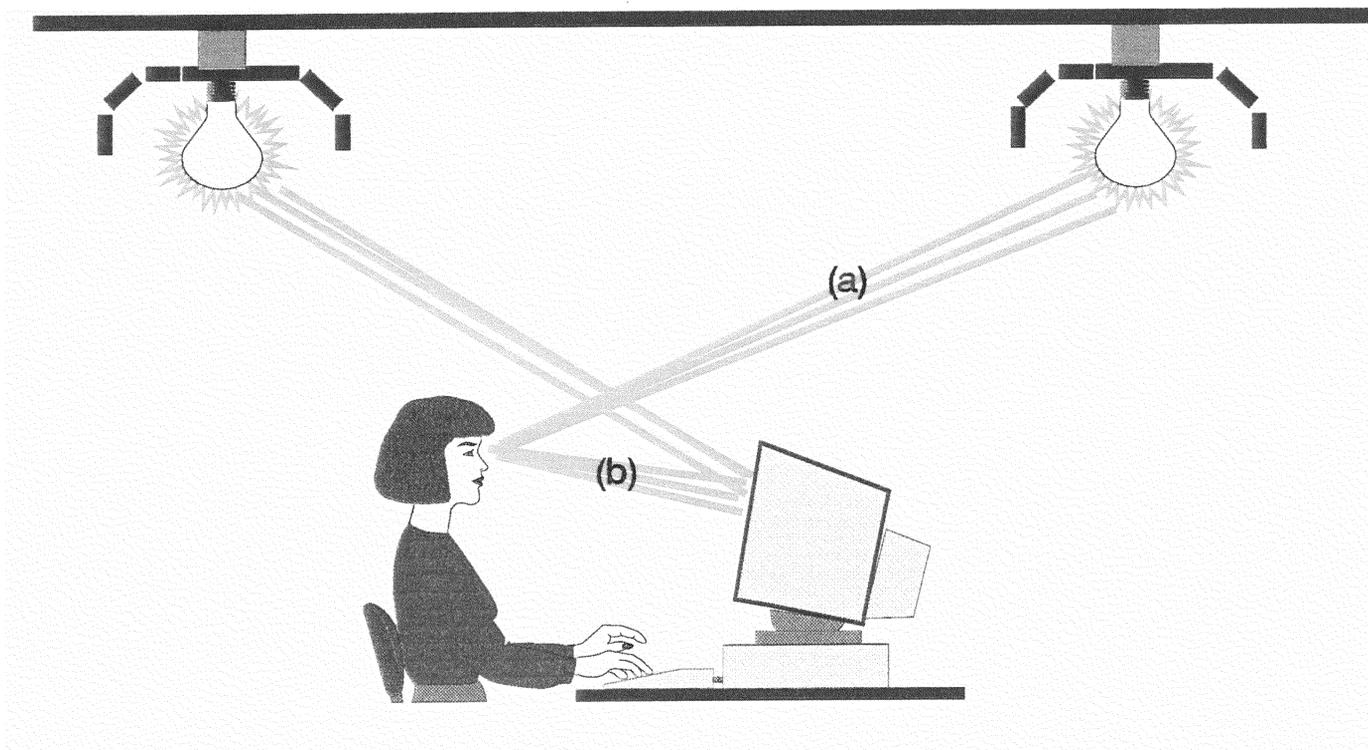


Figure 8.1. Eblouissement : (a) direct, (b) indirect (par réflexion)

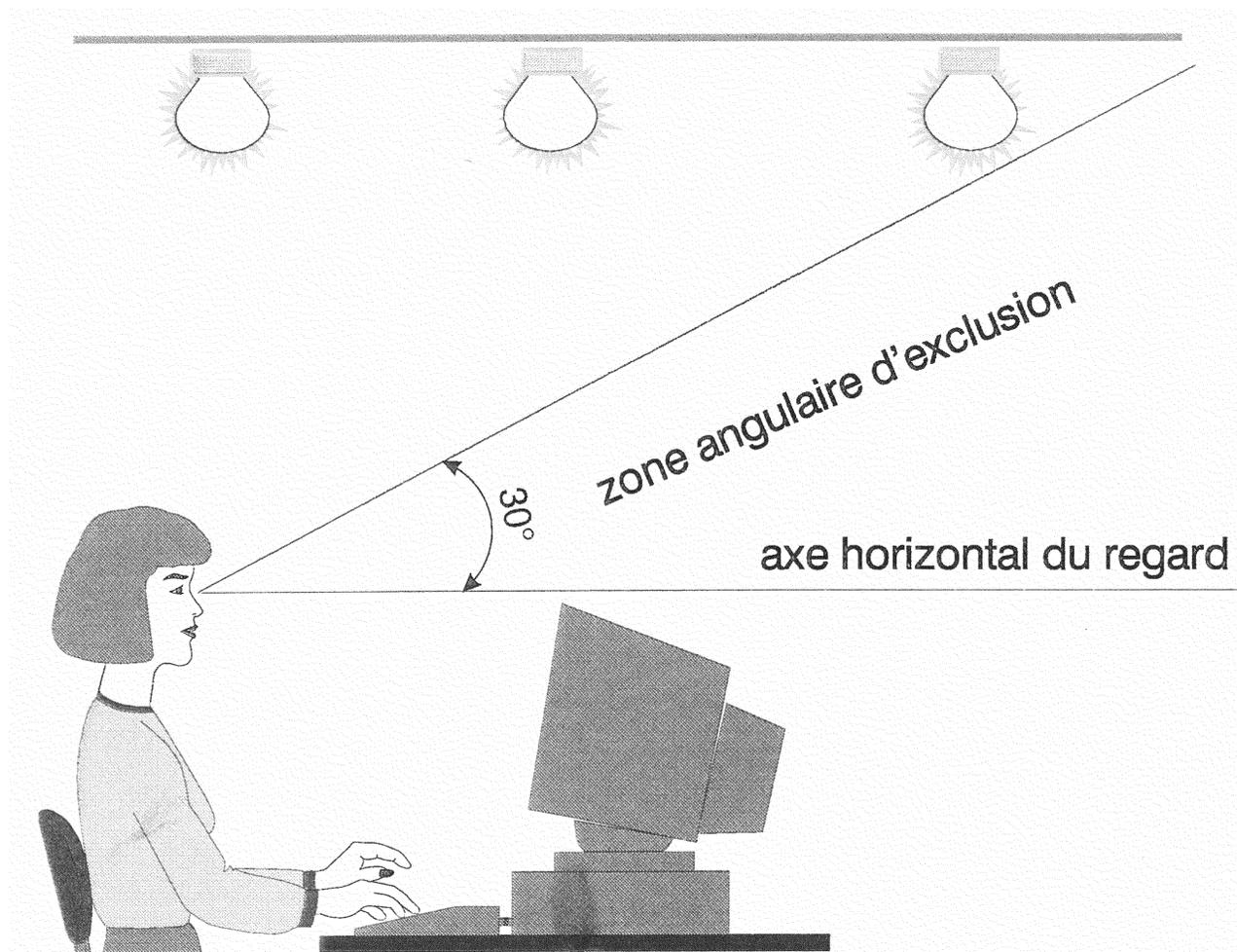


Figure 8.2. Zone angulaire d'exclusion de la vue des lampes nues

FICHE n° 9

PLAINTES, TESTS ET REMEDES ¹

1. Stratégie d'analyse des plaintes

L'analyse des *plaintes qui mettent en cause l'éclairage* est une opération qui mérite une attention particulière parce que le même type de plainte peut avoir différentes causes et réciproquement, des plaintes formulées différemment peuvent avoir la même cause. Ainsi, les plaintes peuvent provenir d'un nombre élevé ou réduit de personnes qui travaillent dans la même zone ou dans des zones différentes, sur une même tâche ou sur des tâches différentes. Dans leurs plaintes, les personnes peuvent faire référence à une sensation générale de gêne ou d'inconfort, à une insuffisance d'éclairage général ou local, à une tâche spécifique, etc.

Avant d'effectuer des tests ou des mesures d'éclairage, dans un premier temps il convient de vérifier quatre hypothèses sur les causes probables : insuffisances de l'éclairage général, de l'éclairage d'une zone particulière, de l'éclairage d'une certaine tâche ou de capacités visuelles individuelles. Ainsi, l'éclairage général peut être mis en cause lorsque les plaintes sont

exprimées par des personnes effectuant des tâches différentes dans des zones différentes ; un défaut d'éclairage local est probablement la cause des plaintes provenant des personnes qui effectuent des tâches différentes dans une même zone ; lorsque les plaintes sont exprimées par plusieurs personnes dispersées dans une zone, mais effectuant le même type de travail, il s'agit probablement d'un éclairage inadéquat pour une certaine tâche. Enfin, lorsque plusieurs personnes effectuent le même travail, dans les mêmes conditions d'éclairage mais seulement quelques unes se plaignent, les capacités visuelles individuelles sont probablement en cause.

Afin d'identifier les insuffisances, il convient souvent d'effectuer une investigation plus détaillée. Ceci peut nécessiter des mesures d'éclairage, des discussions avec les plaignants et, si possible, une analyse des conditions qui influencent la visibilité de la tâche. Certains effets de l'éclairage, comme par exemple l'éblouissement, nécessite une exposition prolongée pour produire un effet notable.

¹ adapté de *Lighting at Work*, HSE, 1987 [77].

2. Analyse des situations

Les différentes situations et les remèdes possibles sont présentés de façon synthétique dans les tableaux 9.1 à 9.12 pour en faciliter l'utilisation.

<p style="text-align: center;"><u>Tests</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Mesurer l'éclairement sur la zone de la tâche et comparer avec les valeurs du tableau 6.4 (voir fiche 6 § 2.2.1)• Mesurer l'éclairement sur la zone de la tâche et comparer avec les valeurs du tableau 6.4 (voir fiche 6 § 2.2.1)• Contrôler le rapport espacement/hauteur des sources d'éclairement et vérifier s'il correspond au cahier des charges• Contrôler la présence de réflexions de voile en protégeant la zone de la lumière incidente qui est ensuite réfléchi vers l'opérateur (voir figure 9.1) <p style="text-align: center;"><u>Remèdes possibles</u></p> <ul style="list-style-type: none">⇒ Nettoyer les lampes et les luminaires⇒ Remplacer les ampoules grillées⇒ Augmenter le coefficient de réflexion des surfaces de la pièce⇒ Éliminer les obstructions à la lumière⇒ Réduire l'espacement entre les luminaires ou rajouter des luminaires⇒ Fournir un éclairage d'appoint⇒ Déplacer la zone de travail <p style="text-align: center;"><u>Observations</u></p> <ul style="list-style-type: none">- Cette plainte peut également être provoquée par une réduction du contraste à cause des réflexions de voile.- Un espacement excessif entre luminaires peut produire un éclairage inégal.
--

Tableau 9.1 : Lumière insuffisante sur la tâche

<p style="text-align: center;"><u>Tests</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Mesurer l'éclairement sur la zone de la tâche et le comparer avec les données du tableau 6.4 (voir fiche 6 § 2.2.1)• Contrôler la présence de réflexions de voile (voir figure 9.1)• Contrôler le rapport espacement/hauteur des sources d'éclairement et vérifier s'il correspond au cahier des charges• Contrôler la présence de l'éblouissement gênant et comparer le confort visuel avec et sans protection des yeux contre la lumière directe des luminaires (voir figure 9.2) <p style="text-align: center;"><u>Remèdes possibles</u></p> <ul style="list-style-type: none">⇒ Réduire le coefficient de réflexion des surfaces dans la zone de travail⇒ Éteindre quelques lampes sans produire un éclairage inégal <p style="text-align: center;"><u>Observations</u></p> <ul style="list-style-type: none">- Plainte habituellement associée à des observations telles que "la lumière est trop brillante"- Ces observations relèvent d'un éblouissement gênant ou de réflexions de voile.
--

Tableau 9.2 : Trop de lumière sur la tâche

Tests

- Mesurer l'éclairage sur l'ensemble du plan de travail et des zones adjacentes où sont utilisés l'éclairage local et localisé et le comparer avec les Tableaux 6.4 et 6.5 (voir fiche n° 6 § 2.2.1 et § 2.2.2)
- Contrôler que le plafond et les murs sont éclairés de façon adéquate
- Contrôler le rapport espacement/hauteur et vérifier le cahier des charges

Remèdes possibles

- ⇒ Remplacer les ampoules grillées et nettoyer les luminaires
- ⇒ Fournir des luminaires supplémentaires
- ⇒ Diminuer l'espace entre les luminaires
- ⇒ Modifier les luminaires afin d'augmenter la largeur de la distribution de la lumière ; rajouter davantage de lumière au plafond, mais sans éblouir l'opérateur
- ⇒ Augmenter le coefficient de réflexion des surfaces de la pièce
- ⇒ Eliminer les obstructions à la lumière
- ⇒ Eliminer les obstructions à la lumière

Observation

- Les niveaux d'éclairage dans la zone de travail ne doivent pas être inférieurs aux niveaux recommandés dans le tableau 6.4 ; vérifier les rapports de luminance (tableau 6.5).

Tableau 9.3 : Eclairage inégal

Tests

- Evaluer l'effet éblouissant du luminaire en protégeant les yeux avec la main (voir figure 9.2)
- Pour des lampes (tubes) nues, contrôler qu'elles se trouvent dans la zone d'exclusion (voir fiche n° 8, tableau 8.2 et figure 8.2)

Remèdes possibles

- ⇒ S'il s'agit de lampes nues, installer un variateur de lumière ou les placer en dehors de la zone d'exclusion
- ⇒ S'il s'agit de luminaires linéaires, modifier leur orientation pour le disposer avec le bout dans la direction du regard
- ⇒ Augmenter la hauteur des luminaires, mais conserver un niveau d'éclairage acceptable
- ⇒ Augmenter le coefficient de réflexion des surfaces de la pièce

Observation

- Les plaintes de cette nature sont presque toujours en relation avec l'éblouissement gênant ou perturbateur.

Tableau 9.4 : Luminaires trop brillants

Tests

- Mesurer les facteurs de réflexion (voir fiche n° 2) des surfaces qui entourent la zone de travail et/ou de celles proches de la ligne du regard et les comparer avec ceux recommandés par l'A.F.E. (voir fiche n° 8 § 5.1)

Remèdes possibles

- ⇒ Augmenter les facteurs de réflexion bas des surfaces
- ⇒ Réduire les facteurs de réflexion hauts des surfaces

Observations

- Les plaintes peuvent être associées à l'éblouissement
- L'inconfort considéré ici est surtout lié aux différences trop grandes des facteurs de réflexion des surfaces qui entrent dans le champ visuel.

Tableau 9.5 : Différence de luminance excessive

Tests

- Evaluer l'inconfort provoqué par les réflexions de voile en obstruant la lumière réfléchie par l'écran (voir figure 9.1)
- Localiser les sources de réflexions de voile en plaçant un miroir sur la surface de la tâche et en le regardant de la position du travailleur (voir figure 9.3)

Remèdes possibles

- ⇒ Remplacer les matériaux polies des surfaces proches de la tâche par des matériaux mates
- ⇒ Déplacer la tâche
- ⇒ Déplacer toutes les sources de luminance élevée
- ⇒ Augmenter le coefficient de réflexion des surfaces de la pièce afin d'augmenter la lumière réfléchie par ces surfaces
- ⇒ Fournir un éclairage local supplémentaire adéquat

Observation

- Les réflexions de voile apparaissent lorsque toute la surface ou uniquement certains détails de la tâche présentent des luminances élevées.

Tableau 9.6 : Contraste réduit au niveau de la tâche à cause des réflexions de voile

Tests

- Evaluer l'inconfort provoqué par la luminance du ciel en protégeant la vue contre la lumière directe des fenêtres des lucarnes et/ou du plafond lumineux (voir figure 9.2)

Remèdes possibles

- ⇒ Installer des stores aux fenêtres et peindre les lucarnes en blanc
- ⇒ S'assurer que les murs et les zone du plafond entourant les fenêtres et les lucarnes ont un coefficient de réflexion élevée
- ⇒ Réarranger le poste de travail afin d'éviter que la personne regarde vers les fenêtres/lucarnes

Observation

- Cette plainte est probablement en relation avec un éblouissement gênant ou perturbateur.

Tableau 9.7 : Excès de lumière du ciel vu par les fenêtres ou par les lucarnes

Tests

- Evaluer la probabilité d'apparition d'images réfléchies lorsque l'opérateur examine la tâche visuelle
- Localiser la source de l'image brillante en plaçant un miroir sur l'image réfléchie; regarder le miroir de la place occupée par l'opérateur (voir figure 9.3)

Remèdes possibles

- ⇒ Modifier la surface adjacente à la tâche qui provoque une réflexion spéculaire par une surface par une surface qui réfléchit la lumière de façon diffuse
- ⇒ Repositionner la zone de travail afin d'éviter les réflexions
- ⇒ Repositionner les sources de lumière qui se reflètent dans la tâche visuelle adjacentes à la tâche

Observation

- Les images brillantes à proximité de la tâche peuvent également distraire l'attention.

Tableau 9.8 : Images brillantes réfléchies à proximité de la tâche

<p style="text-align: center;"><u>Tests</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Identifier les aspects de la tâche qui doivent être vus et le fond sur lequel ils sont vus• Contrôler l'adéquation entre le niveau d'éclairage et les exigences visuelles de la tâche. Vérifier la distribution des luminances et l'éventualité des réflexions de voile, d'ombres sur la tâche, de surfaces réfléchissantes <p style="text-align: center;"><u>Remèdes possibles</u></p> <ul style="list-style-type: none">⇒ Simplifier le fond sur lequel la tâche est vue⇒ Fournir un éclairage adéquat pour améliorer la vision des détails⇒ Augmenter le contraste de la tâche.

Tableau 9.9 : La tâche est difficile à voir

<p style="text-align: center;"><u>Tests</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Placer un objet mince (ex. un crayon) sur le plan de travail et noter le nombre et l'intensité de toutes les ombres <p style="text-align: center;"><u>Remèdes possibles</u></p> <ul style="list-style-type: none">⇒ Augmenter le coefficient de réflexion de toutes les surfaces de la pièce⇒ Remplacer les luminaires individuels par des luminaires disposés sur une grande surface
--

Tableau 9.10 : Ombres intenses sur la tâche provoquées par un éclairage orienté

<p style="text-align: center;"><u>Test inutile</u></p> <p style="text-align: center;"><u>Remèdes possibles</u></p> <ul style="list-style-type: none">⇒ Remplacer les tubes usagés⇒ Vérifier les circuits, éliminer les instabilités dans l'alimentation⇒ Ajouter des rangées de luminaires en opposition de phase

Tableau 9.11 : Papillotement

<p style="text-align: center;"><u>Test inutile</u></p> <p style="text-align: center;"><u>Remèdes possibles</u></p> <ul style="list-style-type: none">⇒ Ajouter des rangées de luminaires en opposition de phase⇒ Fournir une alimentation à haute fréquence⇒ Éliminer l'effet stroboscopique à l'aide d'un éclairage local qui présente moins de variations de lumière (exemple : lampes à tungstène)

Tableau 9.12 : Effets stroboscopiques

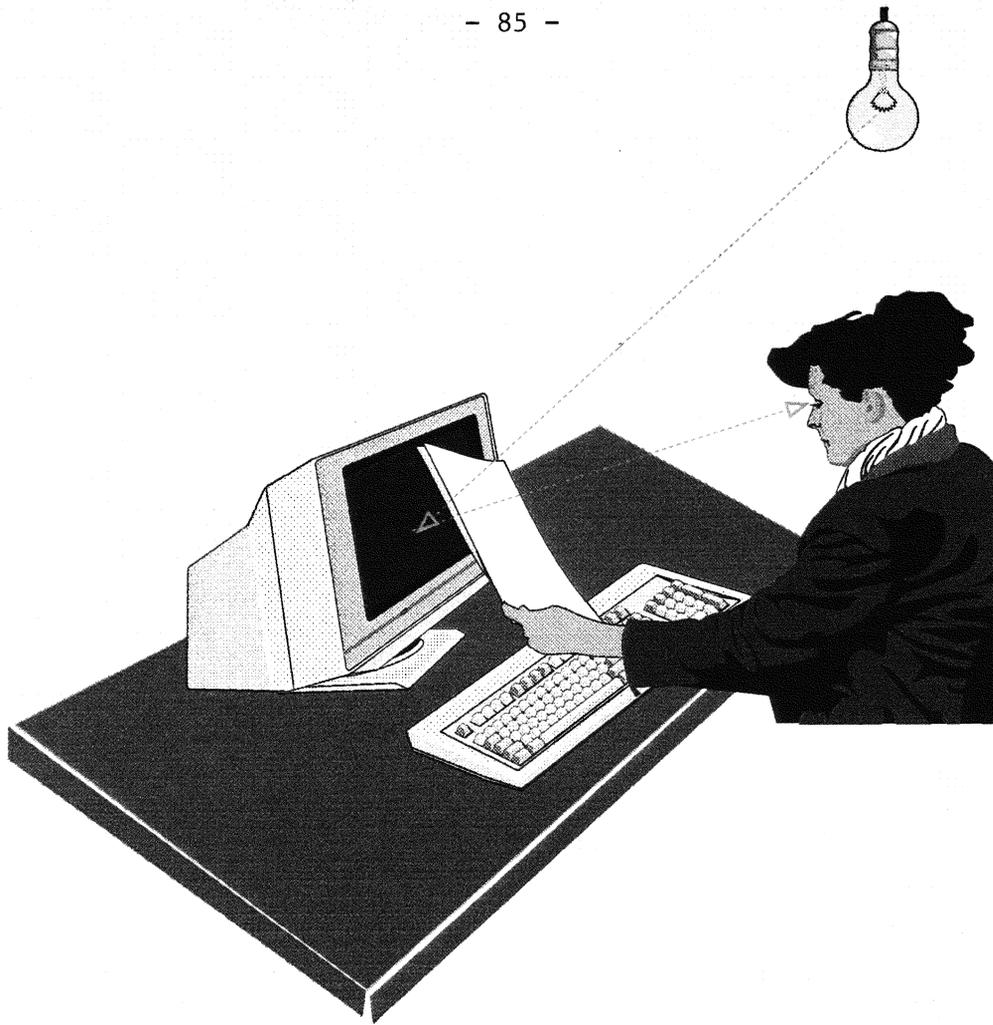


Figure 9.1. Contrôle des réflexions de voile

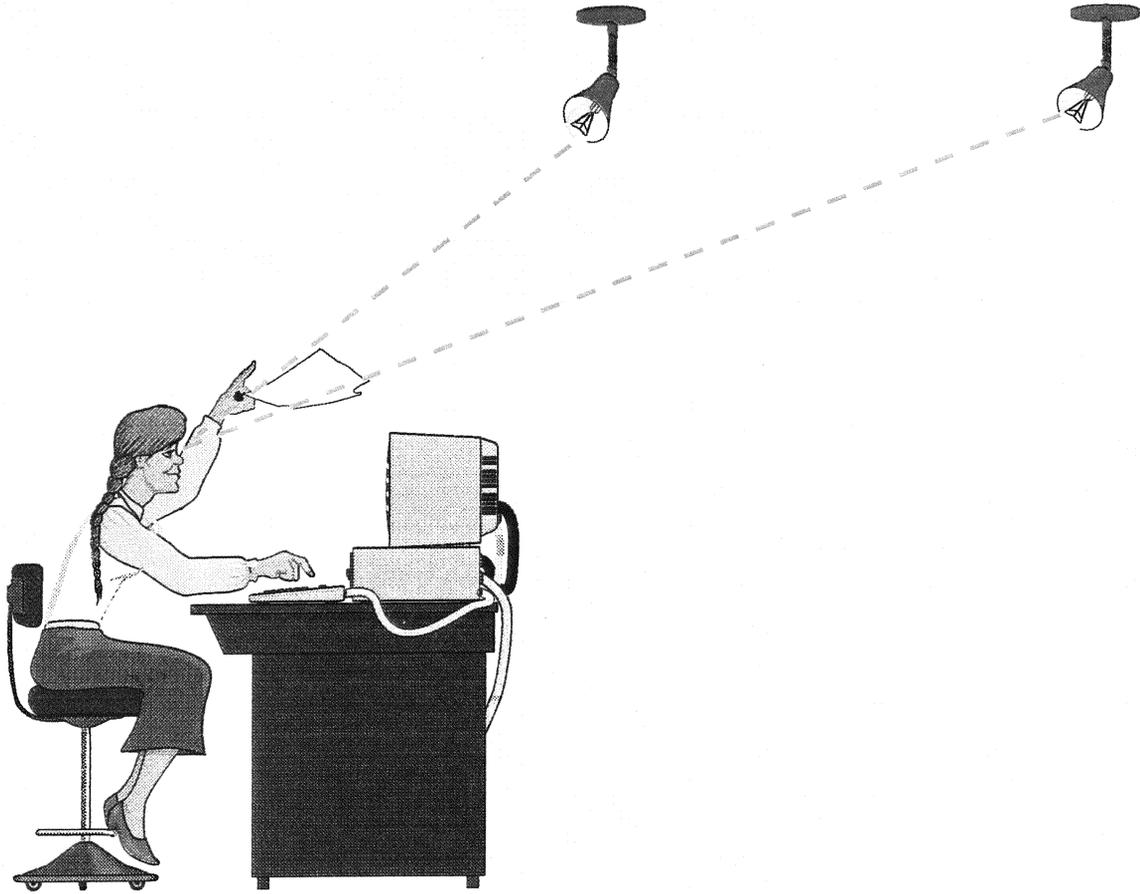


Figure 9.2. Contrôle de l'éblouissement gênant dû à la vision directe des luminaires



Figure 9.3. Utilisation d'un miroir pour identifier l'origine des réflexions

ECLAIRAGE DANS LES LOCAUX INDUSTRIELS

Introduction

L'éclairage industriel doit fournir une quantité et une distribution adéquate de lumière pour optimiser la visibilité, la performance visuelle et la productivité ; il doit également contribuer à la sécurité et au bien-être des travailleurs.

Les activités dans l'industrie englobent une multitude de tâches visuelles qui doivent être exécutées dans une grande variété de conditions. Ainsi, les tâches peuvent avoir des dimensions et des formes très variées ; les objets manipulés peuvent être opaques, transparents ou translucides, disposés sur une surface où la réflexion de la lumière est spéculaire ou diffuse ; ils peuvent être fixes ou mobiles, etc.. Lorsque les conditions d'éclairage sont adaptées aux exigences visuelles de la tâche, elles exercent une influence favorable sur la visibilité et la performance. En effet, un éclairage de haute qualité peut augmenter la vitesse de perception dans des tâches qui exigent la discrimination rapide de détails fins ; de même, un niveau d'éclairage local plus élevé que celui de l'environnement peut compenser la diminution des capacités visuelles des personnes âgées. Enfin, les zones de travail où des tâches de précision doivent être effectuées pendant de longues périodes nécessitent un éclairage quantitatif et qualitatif différent de celles où les tâches visuelles ont un caractère sporadique.

En pratique, des installations d'éclairage industriel médiocre ou de très mauvaise qualité peuvent être facilement identifiées comme inconfortables et comportant des risques potentiels pour la sécurité. En

revanche, lorsque les déficiences sont modérées, soit elles ne sont pas détectées soit leurs répercussions immédiates sont minimisées et les répercussions à terme ignorées. Cependant, des éblouissements légers peuvent, par effet cumulatif, diminuer l'efficacité visuelle et entraîner une fatigue visuelle excessive qui diminue la performance et la sécurité.

1. Eclairage

1.1. Niveau d'éclairage

Le niveau d'éclairage requis dépend en premier lieu des particularités de la tâche visuelle (dimension du détail critique, contraste) et de la performance exigée, en termes de vitesse et de précision. Les recommandations d'éclairage (voir fiche n° 6) permettent d'établir d'abord une catégorie de niveaux d'éclairage et ensuite d'ajuster ces niveaux en fonction de la tâche et des capacités visuelles de l'opérateur. Ainsi, la société américaine d'éclairage (Illuminating Engineering Society - IES) établit 9 *Catégories d'Eclairage* de A à I, pour des niveaux d'éclairage de 20 à 20 000 lux, d'après celles recommandées par la CIE [94] (tableau 10.1). Chaque catégorie comporte 3 niveaux d'éclairage ; après avoir déterminé la catégorie correspondant à l'activité ou à la tâche visée, la valeur finale est choisie en pondérant le niveau selon les critères d'âge, d'exigences de performance et des facteurs de réflexion (tableau 10.2). Ainsi, les recommandations de la CIE pour choisir un niveau d'éclairage sont combinées aux informations et aux évaluations de l'utilisateur [94].

Types d'activité	Catégories d'éclairément	Niveaux de l'éclairément (lux)	Plan de travail de référence
Espaces publics comportant un environnement sombre	A	20-30-50	Eclairage général
Zone de circulation, courtes visites	B	50-75-100	
Espaces de travail où les tâches visuelles sont occasionnelles	C	100-150-200	
Tâches visuelles à contraste élevé ou de grande taille	D	200-300-500	Eclairage de la tâche
Tâches visuelles à contraste moyen ou de petite taille	E	500-750-1000	
Tâches visuelles à faible contraste ou de très petite taille	F	1000-1500-2000	
Tâches visuelles de longue durée, faible contraste ou de très petite taille	G	2000-3000-5000	Eclairage de la tâche : Eclairage général et local combinés
Tâches visuelles de longue durée et très pénibles	H	5000-7500-10000	
Tâches visuelles très spéciales à très faible contraste et de petite taille	I	10000-15000-20000	

Tableau 10.1 : Catégories et niveaux d'éclairément pour différents types d'activités à l'intérieur [94]

Caractéristiques du local et des personnes	Facteurs de pondération		
	- 1	+ 1	0
Age des occupants	< 40 ans	40 à 50	> 50 ans
Facteur de réflexion des surfaces de la pièce	> 70 %	30 à 70 %	< 30 %

a. Pour les catégories d'éclairément de A à C

Tâches et caractéristiques des travailleurs	Facteurs de pondération		
	- 1	+ 1	0
Age des travailleurs	< 40 ans	40 à 50	> 50 ans
Facteur de réflexion du fond de la tâche	> 70 %	30 à 70 %	< 30 %

b. Pour les catégories d'éclairément de D à I

Tableau 10.2 : Facteurs de pondération pour la sélection des niveaux d'éclairément [94]

1.2. Sélection du niveau d'éclairément

Il s'agit de déterminer un niveau d'éclairément pour une tâche visuelle et non pour un espace donné. En effet, cette quantité de lumière à fournir sur le plan de travail dépend des caractéristiques visuelles de la tâche. Par conséquent, l'importance, la difficulté et la durée de chaque tâche dans

la zone donnée doivent être prises en considération comme si chacune, à titre individuel, pouvait exiger un niveau individuel d'éclairément. Ensuite, il faut choisir entre des niveaux multiples d'éclairément qui séparent les différentes tâches entre elles et un niveau unique d'éclairément qui corresponde aux exigences communes à plusieurs tâches.

La sélection d'une catégorie d'éclairage comporte une succession d'opérations qui peut être divisée en 4 étapes [94] :

I. Définir la tâche visuelle

- Déterminer le type d'activité pour lequel il faut choisir le niveau d'éclairage (tableau 10.1, col.1).
- Préciser le plan de travail de la tâche visuelle pour laquelle le niveau d'éclairage va être appliqué (Exemple : lire des textes imprimés sur une surface horizontale).

II. Sélectionner la catégorie d'éclairage

- Choisir la catégorie d'éclairage adéquate au type spécifique de tâche (tableau 10.1, col.2).

III. Déterminer la catégorie d'éclairage (tableau 10.1, col.3)¹

- Les catégories A-C impliquent un éclairage sur toute la zone considérée, la tâche visuelle étant constante (exemple: se déplacer au rez-de-chaussée jusqu'à l'ascenseur).
- Les catégories D-F se réfèrent à des tâches qui sont relativement fixes ; toutefois, les tâches peuvent être différentes d'une place à une autre à l'intérieur d'une zone donnée (exemple : bureau de comptabilité comportant des tâches de secrétariat, avec ou sans terminal). Dans ce cas, chaque tâche doit être éclairée selon ses particularités.
- Les catégories G-I concernent des tâches visuelles extrêmement pénibles et il n'est pas facile de les éclairer. Pour des raisons pratiques et économiques, les systèmes d'éclairage adéquat nécessitent la combinaison d'un éclairage général et d'un éclairage d'appoint.

IV. Etablir la valeur de l'éclairage de la tâche

- Pour les catégories A-C, il faut introduire les adaptations et les corrections selon l'âge des personnes qui occupent l'espace et les facteurs de réflexion des surfaces - sol, murs, plafond (voir fiches n° 2 et 8).

- Pour les catégories D-I, il faut connaître les exigences de la tâche et l'âge des personnes qui travaillent dans l'espace donné. Ainsi, lorsqu'il s'agit d'une tâche de lecture de listings, un échantillon du papier peut servir à déterminer le facteur de réflexion du fond de la tâche. Les exigences de rapidité et de précision peuvent être identifiées lorsqu'il s'agit d'une tâche qui s'effectue sous pression du temps.

Après avoir précisé ces informations, la valeur finale (niveau d'éclairage) doit être déterminée de la manière suivante (tableau 10.2) :

- Examiner les trois caractéristiques (âge, exigences de la tâche, facteur de réflexion) et déterminer le facteur de pondération (-1, 0, +1)
- Faire la somme algébrique des trois facteurs
- Si le total est -2 ou -3, choisir la valeur la plus petite ; si le total est +2 ou +3, choisir la valeur la plus grande; pour les autres cas, utiliser la valeur moyenne des trois valeurs (niveaux d'éclairage) du tableau 10.1.
- Pour l'environnement des tâches dans les catégories D-I, un éclairage horizontal de 200 lux (20 cd.m⁻²) constitue un minimum acceptable.

2. Distribution des luminances

2.1. Limitation de l'éblouissement (voir fiche n° 8)

2.1.1. Eblouissement direct

Afin de maintenir l'éblouissement direct dans des limites acceptables il faut :

- sélectionner des sources de lumière et des luminaires qui ont de faibles luminances aux angles critiques (voir fiche n° 8) ;
- augmenter l'angle entre la source d'éblouissement et la ligne de vision ;
- augmenter la luminance dans la zone qui entoure la source d'éblouissement.

2.1.2. Eblouissement par réflexion

Le risque d'éblouissement par réflexion est élevé lorsqu'il existe des surfaces brillantes dans le champ visuel. Ainsi, dans un processus de fabrication de produits manufacturés, l'éblouissement constitue un

¹ Des tableaux plus détaillés ont été élaborés pour chaque zone de travail et activité (Exemples : bureaux, magasins, bibliothèques, laboratoires, ateliers...).

problème majeur quand les exigences visuelles sont élevées et les surfaces très luisantes (surfaces métalliques polies). Dans ces cas, l'éblouissement par réflexion peut être éliminé ou minimisé soit en utilisant des sources lumineuses qui ont une faible luminance soit en orientant le travail de façon à éviter les réflexions dirigées directement vers l'oeil.

3. Ombres

Les ombres gênantes doivent être évitées, mais un certain effet d'ombre est parfois souhaitable pour accentuer la profondeur et la forme des objets. Un éclairage supplémentaire peut aider à obtenir ce résultat.

4. Systèmes d'éclairage

4.1. Eclairage général et localisé

Un éclairage *général* et uniforme de la zone de travail fournit des conditions visuelles égales à tous les endroits et confère un degré élevé de flexibilité pour l'emplacement de divers postes de travail.

L'éclairage *localisé* peut être recommandé pour des zones de travail plus limitées ; il est moins coûteux que l'éclairage général et permet d'économiser l'énergie en concentrant la lumière sur certaines zones à condition d'éclairer suffisamment les aires adjacentes (circulation, stockage).

4.2. Eclairage direct, semi-direct et indirect

La plupart des applications industrielles font appel à l'éclairage *direct* ou *semi-direct*. Les types de luminaires qui dirigent une partie de la lumière vers le haut (*semi-direct*) sont préférés pour la plupart des zones. En effet, la composante dirigée vers le haut améliore les rapports de luminance entre les différentes zones de la pièce. Par ailleurs, une luminance élevée sur le plafond peut être obtenue au moyen d'un éclairage additionnel séparé, *indirect*.

5. Eclairage local pour des tâches visuelles spécifiques

5.1. Exigences de la tâche

Les tâches visuelles difficiles exigent souvent un niveau et une qualité d'éclairage plus spécifiques qui ne peuvent pas être obtenus facilement avec un éclairage général. Dans ces cas, des luminaires supplémentaires peuvent apporter un niveau d'éclairement élevé dans des zones restreintes. Ils sont également utilisés lorsqu'il s'agit de fournir une certaine luminance ou une couleur, ou pour diriger les sources lumineuses de façon à produire ou éviter un excès de lumière ou des ombres, pour mettre en évidence les détails d'une tâche.

Avant d'aménager un éclairage local, il est donc nécessaire de définir la nature exacte de la tâche visuelle et de déterminer ses caractéristiques de transmission et de réflexion de la lumière.

L'amélioration de la visibilité d'une tâche dépend de plusieurs facteurs (voir fiche n° 1), parmi lesquels les plus importants sont la luminance, le contraste, la taille et la durée de présentation du détail à percevoir. La visibilité peut être réduite par une luminance insuffisante, par un faible contraste (réflexions de voile), par la petite taille ou par le déplacement trop rapide du détail à percevoir.

L'implantation d'un éclairage supplémentaire doit prendre en considération à la fois le confort visuel des personnes qui en bénéficient directement et de ceux qui travaillent à proximité.

5.2. Luminaires pour l'éclairage local

En fonction des particularités de la tâche, les types de luminaires supplémentaires doivent être soigneusement sélectionnés. En général, les luminaires doivent être montés de façon permanente ; cependant, des bras ajustables, pivotants confèrent une certaine flexibilité. Lorsque des machines ou d'objets doivent être déplacés (montage d'avions, garages...), des luminaires portables peuvent être utilisés.

Les luminaires supplémentaires nécessaires à l'exécution de certaines tâches sont désignés par deux lettres. La première désigne la *distribution de la lumière* : C = concentrée, S (*spread*) = répandue, U = uniforme, P = uniforme avec pattern (configuration) ; la deuxième lettre désigne la *luminance* : H (*high*) = élevée, M = modérée, L (*low*) = faible (voir tableau 10.3). Les groupes de luminaires définis sont les suivants :

- **CH** = unités qui concentrent la lumière avec luminance élevée : lampes à spot réflecteur ou unités avec projecteurs ou lentilles ;
- **SH** = sources de petite surface, ayant une intensité lumineuse et une luminance élevée (réflecteur-diffuseur avec une lampe à décharge) ;
- **SM** = réflecteurs pour lampes fluorescentes à luminance modérée, assurant une distribution large,
- **UL** = unités à moyenne et faible luminance uniforme disposée derrière un panneau de diffusion,
- **PL** = unités du groupe précédent mais comportant une configuration de lignes ou bandes superposées [24].

6. Tâches visuelles et exigences d'éclairage

Les innombrables tâches peuvent être classées selon les détails à percevoir et les exigences d'éclairage. Le tableau 10.3 présente une classification basée sur les caractéristiques visuelles des tâches et non pas sur la tâche à exécuter [24]. Ainsi, sur une foreuse, la tâche visuelle consiste à distinguer la marque du poinçon sur le métal ; la tâche peut être un détail spéculaire sur fond diffus et sombre pour laquelle les luminaires du groupe SH ou SM sont recommandés. Le groupe SH monté sur un support ajustable est recommandé lorsque l'espace est limité. En définitive, tous les groupes de luminaires ou certains d'entr'eux sont applicables à de nombreuses catégories de tâches mais lorsqu'il s'agit de choisir les meilleurs luminaires pour une activité particulière, il convient de prendre en compte les limitations physiques, les possibilités d'emplacement des luminaires et la taille de la tâche qui doit être éclairée.

Caractéristiques générales des tâches visuelles	E X E M P L E Type de tâche Exigences d'éclairage		Type de luminaire recommandé
A. Matériaux opaques			
1. <u>Détail et fond diffus</u> <ul style="list-style-type: none"> • Surface continue • Surface discontinue • Objets tri-dimensionnels 	<ul style="list-style-type: none"> • Correction d'épreuves (journaux) • Rayures, cassures • Salissures sur pièces 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité élevée et confort • Mettre en évidence les discontinuités, le détail à faible contraste 	SM ou SH CH, SM, SH
2. <u>Détail et fond spéculaires</u> <ul style="list-style-type: none"> • Surface continue • Surface discontinue • Couche spéculaire et fond spéculaire • Objets tri-dimensionnels 	<ul style="list-style-type: none"> • Surface inégale, déformée, bosse, creux • Rayure, gravure, poinçon • Inspection de la finition d'un revêtement • Bosse sur argenterie • Rayures 	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en évidence les inégalités de la surface • Créer un contraste entre l'entaille et la surface spéculaire • Mettre en relief les endroits non couverts • Relever les déformations • Relever les discontinuités 	PL SM, UL, PL UL PL, UL UL
3. <u>Surfaces spéculaires et diffuses combinées</u> <ul style="list-style-type: none"> • Détail spéculaire sur fond diffus clair • Détail diffus sur fond spéculaire clair • Détail diffus sur fond spéculaire sombre 	<ul style="list-style-type: none"> • Encre luisante ou marque au crayon sur papier ordinaire • Poinçon, marques sur métal • Gradations micrométriques sur une échelle d'acier • Marques de cire sur une carrosserie d'automobile 	<ul style="list-style-type: none"> • Produire un maximum de contraste sans voile de réflexion • Créer des réflexions brillantes des détails • Créer une luminance uniforme, faible sur un fond spéculaire • Produire une luminance élevée sur fond sombre 	SM, UL SH ou SM UL ou SM SM ou SH
B. Matériaux translucides			
1. <u>Surface diffuse</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Verre dépoli, gravé, plastic, tissus, bonneterie • Ombre de la lampe 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité maximale des détails (surface et structure des matériaux) • Relever les imperfections des matériaux 	Pareil à A ₁ Eclairer à travers SH, SM, UL Eclairer à travers SH
2. <u>Surface spéculaire</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Rayure sur verre opale ou plastic • Globe de verre 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité maximale des détails (surface et structure des matériaux) • Relever les imperfections des matériaux 	Pareil à A ₁ Eclairer à travers SH, SM, UL. PL
C. Matériaux transparents			
<u>Surface transparente</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Plateau de verre • Bouteilles, articles de verre - vides ou remplies de liquide clair 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité des détails internes (ex : bulles) ou externes (rayures) des matériaux • Relever les irrégularités de la surface, fissures, éclats, corps étrangers 	PL plus en avant, puis CH devant le fond noir UL ou PL Eclairer à travers UL, PL
D. Matériaux transparents sur matériaux opaques			
1. <u>Fond diffus</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Outillage • Dessus de table verni 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité maximale de l'échelle et de l'aiguille • Visibilité maximale du détail sur fond spéculaire 	CH, SH PL
2. <u>Fond spéculaire</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Miroir 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité maximale du détail sur ou dans le matériel transparent • Visibilité maximale du détail sur fond spéculaire 	CH PL

Tableau 10.3 : Classification des tâches visuelles et des types de luminaires [24]

7. Effets spéciaux et techniques

L'inspection des *objets très petits* peut être améliorée en les examinant au travers d'aides optiques. L'image agrandie peut être également projetée sur un écran. Dans ce type de travail visuel, les réflexions sur l'écran, l'éblouissement et les contrastes excessifs entre l'écran et l'environnement proche doivent être évités ; il est alors souhaitable de diminuer le niveau d'éclairage.

Les objets *tri-dimensionnels* peuvent être distingués grâce aux ombres et aux lumières qui résultent des composantes "directionnelles" de la lumière. Cet effet est utile surtout lorsqu'il s'agit de mettre en évidence une texture ou les défauts d'une surface inégale.

Le contrôle d'un *contour* peut être effectué en projetant la silhouette d'un modèle standard. Un dispositif d'éclairage situé derrière le modèle met en évidence des zones lumineuses lorsqu'il existe des différences entre le contour du modèle et celui de l'objet contrôlé.

La couleur peut être utilisée pour augmenter le contraste. Ainsi, les imperfections d'un revêtement chromé sur un placage de nickel peut être mis en évidence en utilisant une lumière bleue d'une lampe fluorescente de couleur "froide". La fluorescence qui apparaît sous l'effet des radiations ultraviolettes est souvent utilisée pour augmenter le contraste, pour mettre en évidence des défauts sur des surfaces métalliques, plastiques non poreuses, céramiques... Dans ce cas, il faut éviter les risques que comportent les rayonnements UV pour les yeux, en utilisant des moyens de protection adaptés.

La détection des tensions internes dans les objets de verre, lentilles, ampoules, plastiques transparents, etc. peut être facilitée par l'utilisation de la lumière polarisée. Le facteur non uniforme de transmission spectrale dans les zones sous tension provoque la formation de franges colorées visibles. Enfin, une lumière stroboscopique peut être utilisée pour inspecter et étudier la fréquence de rotation des certains objets mobiles.

ECLAIRAGE DES BUREAUX

Le rôle de l'éclairage est de fournir la quantité et la qualité de lumière nécessaires à l'exécution précise et rapide des tâches spécifiques au secteur tertiaire et de créer un environnement lumineux agréable et confortable. Dans cette perspective, les recommandations générales pour l'éclairage intérieur (voir fiches n° 6, 7, 8) sont applicables à l'éclairage général des locaux à usage de bureaux. Cependant, en pratique, ces recommandations qui visent en priorité à sélectionner le niveau d'éclairage et la distribution de la lumière, doivent être précisées et adaptées aux particularités des tâches de bureau. Pour cela, il est d'abord nécessaire d'analyser les *caractéristiques optiques des sources d'information* (documents, microfiches, écrans de visualisation, etc.),

celles des outils et des *dispositifs* de dessin, des machines de calcul ou des claviers utilisés par l'opérateur dans son travail. Ainsi, lorsque l'information est affichée sur un écran à contraste négatif (caractères clairs sur fond sombre), les conditions de visibilité de la tâche (contraste, netteté, lisibilité des caractères...) diffèrent de celles d'un texte imprimé sur papier (tableau 11.1). La connaissance de ces différences permet de proposer des mesures pour améliorer l'éclairage.

Ensuite, il s'agit de connaître les exigences de performance, en termes de *précision*, *rapidité* et *durée*. Enfin, l'âge et surtout l'état visuel des personnes qui travaillent dans le bureau doivent être pris en considération (voir fiche n° 12).

TEXTE IMPRIME	PRESENTATION DE L'INFORMATION	TEXTE AFFICHE SUR ECRAN (à fond sombre)
noirs/blanc ⇐	<i>Caractères-fond</i>	⇒ clairs-sombre
photopique ⇐	<i>Adaptation</i>	⇒ mésopique
améliore visibilité ⇐	<i>Augmentation de l'éclairage</i>	⇒ diminue le contraste
libre ⇐	<i>Distance oeil-tâche</i>	⇒ imposée : écran-doc-clavier
stable ⇐	<i>Stabilité de luminosité</i>	⇒ parfois fluctuante
stable ⇐	<i>Stabilité de l'image</i>	⇒ parfois instable
libre ⇐	<i>Stratégie d'exploration</i>	⇒ imposée (défilement)
classique ⇐	<i>Forme des caractères</i>	⇒ parfois inhabituelle

Tableau 11.1 : Présentation de l'information sur papier et affichée sur écran de visualisation

1. Bureaux traditionnels

1.1. Exigences visuelles de la tâche

La plupart des activités de bureau comportent des tâches perceptives. Il s'agit surtout de la lecture de documents présentés dans un plan horizontal. La visibilité des textes imprimés ou manuscrits est souvent mauvaise (manque de contraste, caractères de petite taille, illisibles...) et il est souhaitable, avant toute intervention sur

l'éclairage, d'améliorer la qualité typographique des documents pour alléger la charge visuelle des opérateurs.

Lors de l'analyse des exigences visuelles de la tâche, deux catégories de facteurs doivent être pris en considération. La première se réfère aux aspects quantitatifs indispensables à la *visibilité de la tâche* [2] :

- la luminance de la tâche,
- les dimensions du détail,

- le contraste entre détail et fond,
- le temps de perception disponible.

Observations

Chaque facteur dépend suffisamment de la grandeur des autres pour que, dans certaines limites, une déficience de l'un puisse être compensée par l'augmentation des autres. Ainsi, la visibilité d'un détail de petites dimensions peut bénéficier d'une augmentation de la luminance ou du contraste.

La deuxième catégorie concerne les aspects qualitatifs, les facteurs susceptibles d'entamer le *confort visuel* :

- l'*adaptation transitoire*¹ exigée lors des variations de luminance dans l'environnement proche ou plus éloigné,
- l'*éblouissement gênant* provenant des luminaires ou de la lumière du jour,
- les *réflexions spéculaires* ou *diffuses* apparaissant dans le détail ou le fond de la tâche

Observations

Les réflexions de la lumière sur le papier et/ou des outils graphiques (crayon, encre, etc.) ont un caractère plus ou moins spéculaire ou diffus en fonction des matériaux constitutifs, de la position, horizontale ou inclinée, du papier et de la qualité de l'éclairage.

1.2. Environnement lumineux

1.2.1. Niveaux d'éclairage

Les niveaux d'éclairage dans les bureaux sans ordinateur à écran de visualisation ont augmenté progressivement au cours des dernières décennies ; actuellement, des niveaux entre 500 et 2000 lx sont communs. Cependant, en pratique, des niveaux qui dépassent 1000 lx augmentent le risque de réflexions et produisent des zones d'ombre et des contrastes excessifs. La plupart des employés préfèrent des niveaux d'éclairage compris entre **400 et 850 lx**.

¹ Le terme d'*adaptation transitoire* est utilisé pour définir une modification rapide (< 1s) de sensibilité de la rétine lors des variations du niveau d'éclairage.

1.2.2. Qualité de l'éclairage

Indépendamment du niveau d'éclairage de la tâche, la performance et le confort visuel dépendent de l'emplacement des luminaires, de la distribution des luminances, de la tâche visuelle et de la surface de travail. Ces facteurs peuvent réduire le contraste et la visibilité de plusieurs façons: réflexions de voile, éblouissements et ombres. Afin de prévenir ces effets, il est utile de rappeler quelques principes régissant les relations entre la vision et l'éclairage :

- Plus la source d'éblouissement est proche de l'axe optique, plus étendue est l'aire d'éblouissement et plus intense est l'effet de l'éblouissement sur le confort visuel et la performance ;
- Dans une pièce faiblement éclairée, l'effet de l'éblouissement sur la vision est encore plus accentué parce que la rétine reçoit davantage de lumière (la pupille est dilatée en éclairage faible) ;

Le choix et la localisation des sources de lumière doivent être réalisés de façon à *éviter les réflexions directes* de la tâche vers les yeux. Ceci est relativement facile à obtenir dans de petits bureaux ou dans des bureaux individuels mais lorsqu'il s'agit de grands bureaux, le problème est plus difficile à résoudre. Ainsi, les zones de travail et les opérateurs doivent être orientés en fonction de la disposition des luminaires de façon à obtenir un contraste élevé au niveau de la tâche (plus précisément, des valeurs élevées du facteur de rendu du contraste - CRF). Cet objectif peut être également atteint en combinant l'éclairage indirect ou l'éclairage général avec un éclairage d'appoint.

1.2.3. Rapport de luminance

La luminance de la tâche dépend à la fois du niveau d'éclairage et du *facteur de réflexion* des objets éclairés. Le confort visuel dépend de la distribution de luminances dans la zone de travail.

- Pour la plupart des tâches sur papier blanc, le rapport de luminance entre la tâche et l'environnement proche doit être inférieur à **3:1** lorsque celui-ci est sombre et à **1:3** lorsqu'il est clair ;
- Le rapport de luminance recommandé entre la tâche et l'environnement plus

éloigné est *10:1* lorsque celui-ci est sombre et *1:10* lorsqu'il est clair ;

- Afin de diminuer le risque d'éblouissement, il est préférable d'utiliser une surface mate pour la table des bureaux ;
- Le facteur de réflexion de la surface de la table doit être inférieur à celui de la tâche visuelle. Ainsi, par exemple, lorsque le facteur de réflexion d'une feuille de papier est de 0,6 le plateau de la table du bureau doit être compris entre 0,2 et 0,6.

1.2.4. Recommandations pour les bureaux sans écran de visualisation [46]

- Le niveau d'éclairement recommandé se situe entre *500* et *700 lx* ; il convient également prendre en compte l'augmentation des besoins d'éclairement avec l'âge.
- Aucune source lumineuse ne doit apparaître dans le champ visuel de l'opérateur.
- Toutes les sources lumineuses doivent être protégées (abat-jours, grilles de défilement) pour *éviter les luminances supérieures à 200 cd.m⁻²*.
- L'angle formé par le plan horizontal passant par les yeux et la source lumineuse doit *dépasser 30°*.
- Les tubes fluorescents doivent être alignés perpendiculairement à l'axe visuel.
- Il est préférable d'utiliser plusieurs sources de faible intensité plutôt qu'une seule source très puissante.
- Pour éviter les reflets provenant de la surface de la table, l'axe oeil-table ne doit pas coïncider avec l'axe de réflexion de la lumière.
- Il faut éviter l'utilisation des matériels réfléchissants sur la table et les machines à écrire ou à calculer.

1.2.5. Bureaux de dessin

- Les qualités "directionnelles" de la lumière incidente sur la table à dessin sont importantes pour la visibilité de la tâche. Ainsi, les ombres provoquées par divers outils et dispositifs de dessin sur le plan de travail peuvent gêner l'exécution rapide et précise des tâches.
- Beaucoup de dessinateurs industriels préfèrent travailler près d'une fenêtre ; si cette disposition n'est pas possible, un

flux de lumière latérale peut être obtenu au moyen d'une distribution asymétrique des luminaires.

- L'utilisation d'un éclairage indirect peut éviter l'apparition des ombres directes. Toutefois, dans des conditions d'éclairage général, certains dessinateurs préfèrent également un éclairage d'appoint sous leur contrôle [24].

2. Bureaux avec écrans de visualisation

La plupart des bureaux actuels sont pourvus d'ordinateurs à écran de visualisation (EV). L'espace de travail comprend soit exclusivement des postes équipés d'écrans soit des bureaux où coexistent des postes avec et sans écrans. En ce qui concerne l'éclairage des bureaux informatisés, il est nécessaire de savoir comment l'écran va être utilisé, quel type d'image va être affiché et quelles sont les relations spatiales entre l'opérateur, l'écran et le document source d'une part et l'environnement proche ou plus éloigné, d'autre part. Etant donné la diversité des opérations qui comportent l'utilisation des EV, toute intervention sur l'éclairage est subordonnée aux exigences visuelles de la tâche.

2.1. Tâches informatisées

Classées d'après les opérations prédominantes, les principales activités professionnelles sur EV sont la saisie et l'acquisition de données, le dialogue, le traitement de texte et les tâches créatives [85 ; 127].

La saisie de données :

consiste à transférer des informations contenues dans le document source (chèques, fiches, tableaux) dans la mémoire de l'ordinateur, à l'aide du clavier, et à contrôler les entrées affichées sur l'écran (exemples : gestion de dossiers, de produits...).

L'acquisition de données :

comporte la recherche des informations stockées dans la mémoire de l'ordinateur, l'appel des données à l'écran, la consultation et la mise à jour de fichiers. (exemples : opérateurs téléphoniques, consultation de banques de données).

La communication interactive :
dialogue elle inclut l'entrée des données, l'acquisition de données et la consultation des informations en retour de l'ordinateur. (exemples: réservations, commandes...).

Le traitement de texte comprend : la saisie de texte, le rappel, la recherche de mots, la correction, le formatage pour l'impression, etc. (exemples : secrétariat, rédaction d'articles, d'ouvrages).

Les tâches créatives :
concernent des professionnels (ingénieurs, informaticiens) qui développent des programmes ou exploitent des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO), de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO), etc.

Dans l'exécution de différentes tâches informatisées, les exigences visuelles diffèrent d'une activité à l'autre car l'écran peut être utilisé en exclusivité, de façon sporadique ou en association avec la lecture des documents situés à proximité de l'écran. L'environnement lumineux doit être alors adapté aux conditions spécifiques imposées par le type de travail à effectuer.

2.2. Environnement lumineux

Les conditions nécessaires au confort visuel et à une bonne performance sur terminal à écran de visualisation sont :

- un niveau approprié d'éclairage et une constance temporelle de l'éclairage,
- un équilibre spatial des luminances,
- l'absence de réflexions.

Pour les bureaux comportant des EV, le problème de l'éclairage est plus compliqué que celui des bureaux sans écran lorsque l'opérateur doit regarder alternativement un écran sombre et un document source clair. Cependant, la tendance actuelle est d'utiliser des écrans à fond clair et caractères noirs ou des écrans polychromes. Dans tous les cas, une conception ergonomique de l'éclairage dans des bureaux informatisés doit :

- satisfaire les exigences visuelles de la lecture sur écran et document,
- contrôler l'éblouissement,
- limiter les luminances dans la zone qui entoure la tâche et dans le champ visuel dynamique de l'opérateur.

2.2.1. Niveaux d'éclairage

Dans un bureau qui comporte des EV, il est préférable que l'éclairage général soit maintenu à un niveau relativement faible, complété éventuellement d'un éclairage d'appoint pour la lecture des documents. Lorsqu'il s'agit d'EV à caractères clairs sur *fond sombre*, une lecture optimale sur écran nécessite un faible niveau d'éclairage (**200 lux**) ; pour la lecture du document, le niveau peut dépasser **300 lux**. Pour un travail sur écran à *fond clair*, le niveau d'éclairage préconisé est de **300 à 500 lux**. Toutefois, le facteur déterminant de la qualité de l'image et du confort visuel est le *contraste de luminance* entre les différentes zones de l'environnement visuel.

2.2.2. Luminance

Afin d'obtenir un équilibre confortable entre les luminances dans l'environnement proche et limiter en même temps les effets de l'adaptation transitoire et de l'éblouissement perturbateur, les rapports de luminance ne doivent pas dépasser ceux recommandés pour les bureaux conventionnels (voir § 2.3). A l'intérieur de ces limites, il est possible de diversifier l'environnement en modifiant le facteur de réflexion des surfaces et/ou les couleurs. En effet, le contraste chromatique peut augmenter la clarté visuelle, la perception de la profondeur et l'orientation sans intervenir sur les luminances.

Pendant le travail sur EV, trois facteurs peuvent modifier la luminance de la tâche visuelle : la lumière du jour, les luminaires et les tâches sur papier.

La lumière du jour peut poser des problèmes lorsque l'image du ciel, des bâtiments, du paysage ou du soleil pénètre dans le champ visuel. Le contrôle des variations de luminance engendrées par la lumière du jour est donc impérative dans les bureaux avec des terminaux à écran.

Il existe une différence significative entre l'exécution d'une tâche sur EV et sur papier. En effet, lors d'une lecture sur papier, l'opérateur regarde vers le bas un document situé dans un plan horizontal tandis que les tâches sur EV sont exécutées avec la "tête relevée". A cause de cette

position, dans les grands bureaux, les luminaires ou une partie du plafond peuvent entrer dans le champ visuel. Il convient alors de contrôler la luminance des luminaires et du plafond (s'il s'agit d'un éclairage indirect) afin d'éviter l'éblouissement gênant ou des problèmes d'adaptation.

Il existe une contradiction entre deux recommandations : la première concerne le niveau d'éclairage pour la lecture des documents, la deuxième, le rapport de luminance entre l'écran et le document situé à proximité de l'écran. En effet, à partir d'un éclairage de 750 lux sur papier à fond blanc dont le coefficient de réflexion est de 80 % la luminance qui en résulte est d'environ 200 cd.m⁻² ; si la luminance moyenne de l'écran est de 50 cd.m⁻², celle du papier est quatre fois plus élevée². Le rapport de luminance recommandé (3:1) entre document et écran est dépassé. Il convient alors de contrôler les luminances, d'augmenter la luminance moyenne de l'écran et d'utiliser un écran à contraste positif (caractères sombres sur fond clair).

En ce qui concerne les rapports optimaux de luminance entre écran et document source, ils dépendent de l'intensité de l'éclairage général, de la dimension de la source d'éblouissement et de la distance entre cette source et l'axe visuel.

Exemples

Lorsque la luminance de l'aire centrale du champ visuel est 5 fois plus intense ou plus sombre que les aires adjacentes, la sensibilité de l'oeil au contraste diminue. Si la luminance des aires adjacentes est plus intense que celle de la zone centrale, les opérateurs se déclarent davantage perturbés que dans les cas précédents.

Recommandations :

- Le rapport des luminances entre l'écran et l'environnement ne doit pas dépasser **1:5** pour le champ proche et **1:10** pour le champ éloigné.
- Le contraste entre les caractères et le fond de l'écran doit être ajustable pour tenir compte des préférences individuelles puisque l'acuité visuelle

optimale peut être obtenue avec un large éventail de contrastes.

- Pour l'écran à caractères clairs sur fond sombre, les opérateurs préfèrent une luminance des caractères située entre 23 et 42 cd.m⁻², avec un contraste optimal de 1:3 à 1:15.
- Pour les écrans à caractères sombres sur fond clair, les opérateurs préfèrent une luminance du fond située aux environs de 80 cd.m⁻² pour le même contraste optimal.
- L'augmentation de la luminance présente l'avantage d'augmenter l'acuité visuelle et de diminuer le rapport des luminances entre l'environnement et l'écran.

Observations

- L'écran à fond clair présente l'avantage d'être moins sensible aux réflexions spéculaires ou diffuses. Par conséquent, il contribue à la réduction de l'inconfort dû à l'éblouissement et aux réflexions. De plus, les conditions d'éclairage sont moins strictes que pour le poste de travail avec écran à fond sombre.
- Les contrastes élevés, déjà gênants lorsque le regard est relativement stable, le deviennent encore plus lorsque le regard de l'opérateur se déplace constamment entre différents points de l'espace dont les luminances sont très différentes. En effet, dans ces conditions, la rétine et la pupille doivent s'adapter à des conditions qui changent rapidement ; étant donné que les constantes de temps de réponse des systèmes adaptatifs sont très longues, l'oeil ne peut s'adapter totalement et fonctionne dans des conditions qui s'écartent sensiblement de l'optimum. Il convient donc de veiller à l'équilibre des luminances dans le champ visuel.

2.2.3. Réflexions

Les réflexions sur la surface de l'écran constituent un autre facteur perturbateur de la vision. La surface de l'écran reflète environ 4 % de la lumière incidente. Une partie est reflétée par la surface vitrée de l'écran et produit des images comme un miroir (*réflexions spéculaires*) ; ce facteur de réflexion est suffisant pour refléter des images claires des lampes, du clavier, de l'opérateur, etc. L'autre partie est reflétée par la couche de phosphore et produit des réflexions diffuses (voile) de la source lumineuse.

Les réflexions diffuses à forte luminance réduisent le contraste et peuvent être également source d'éblouissement. Les

² La luminance du fond noir d'un écran est d'environ 5 cd.m⁻², celle du fond blanc d'un écran à contraste positif est d'environ 80 cd.m⁻².

réflexions spéculaires sont gênantes surtout parce qu'elles interfèrent avec les mécanismes de focalisation. En effet, l'oeil est forcé de focaliser alternativement sur le texte et sur l'image reflétée (virtuelle). De plus, les réflexions constituent une source de distraction. Enfin, les éblouissements sont à la fois gênants et provoquent un allongement du temps de lecture. La suppression des réflexions peut donc contribuer à réduire substantiellement la charge visuelle.

2.2.4. Recommandations pour les postes de travail sur écran [22 ; 47 ; 58].

Niveau d'éclairement

- écran à contraste négatif : 200-300 lx
- écran à contraste positif : 300-500 lx

Equilibre des luminances

- Ecran - document : 1:5, maximum 1:10

Pour éviter l'éblouissement

il convient de respecter les règles suivantes :

- Eviter des fluctuations rapides d'éclairement
- Aucune source lumineuse perceptible ne doit apparaître dans le champ visuel
- L'écran doit être placé à angle droit par rapport aux fenêtres et à distance de 2 m au minimum.
- Les luminaires doivent être placés parallèlement à l'axe opérateur-écran
- Les luminaires doivent être pourvus de grilles de défilement
- Eviter l'apparition de reflets sur écran.

LAMPES ET LUMINAIRES

Dans l'environnement de travail, l'éclairage artificiel est fourni par des lampes et des luminaires.

1. Lampes

Les *lampes* sont des sources qui convertissent l'énergie électrique en lumière. Leur performance, en termes de quantité et qualité de lumière émise, varie selon certaines caractéristiques qui distinguent les différentes familles de lampe. Il est donc nécessaire de connaître ces caractéristiques afin de choisir le matériel adéquat lors de la conception ou de la correction d'un système d'éclairage.

1.1. Critères de choix des lampes

Le choix des lampes pour l'éclairage de différentes zones de travail est déterminé principalement par des critères ergonomiques et économiques.

Selon des critères *ergonomiques*, les sources de lumière doivent être adaptées aux *exigences visuelles* de la tâche (visibilité, performance et confort).

Les critères *économiques* incluent, entre autres, le prix de revient et d'exploitation et la durée de vie des lampes.

1.1.1. Caractéristiques des lampes

Les principales caractéristiques des lampes à prendre en compte sont :

- Le *type* de lampe. Les lampes le plus fréquemment utilisées sont les lampes à *incandescence*, *fluorescentes* et à *décharge* ;
- L'*efficacité lumineuse*. Il s'agit du rapport entre le *flux lumineux* émis par la lampe exprimé en lumens et la *puissance* électrique consommée exprimée en

Watt¹; l'efficacité d'une lampe est alors exprimée en lumens par watt (lm.W^{-2}) ;

- La *durée de vie* de la lampe. Etant donné que le flux lumineux d'une lampe diminue dans le temps, la durée moyenne de vie d'une lampe se mesure en nombre d'heures d'éclairage à partir duquel 50 % des lampes de même caractéristique cessent de fonctionner ;
- La *couleur apparente*. Elle est définie par la température de couleur de la lampe, exprimée en Kelvin (voir fiche n° 7) ;
- Le *rendu des couleurs*. C'est la propriété d'une lampe de restituer la couleur des objets éclairés. Le rendu de couleur est caractérisé par l'indice de rendu de couleur - IRC ou R_a (voir fiche n° 7).

Observations

- Des lampes de la même couleur apparente peuvent fournir des rendus de couleurs très différents ;
- Lorsque le niveau d'éclairage est faible, il est préférable d'utiliser une couleur chaude ;
- Lorsque le niveau d'éclairage est élevé, proche de la lumière naturelle, une couleur plus froide est recommandée ;
- Pour les locaux de travail, des teintes intermédiaires sont le plus fréquemment utilisées [4].

1.1.2. Avantages et inconvénients de différentes familles de lampes [4]

1.1.2.1. Lampes à incandescence

Les lampes à incandescence sont constituées d'une ampoule de verre renfermant un filament en tungstène porté à l'incandescence par le passage d'un courant électrique. L'ampoule des lampes ordinaires est remplie d'un gaz inerte (argon, krypton, xénon). Les lampes aux halogènes contiennent en plus une faible proportion d'un halogène (iode, brome, fluor) ou d'un composé halogéné qui ralentit l'usure du filament.

¹ L'efficacité lumineuse est un critère de choix important pour l'évaluation du coût d'exploitation d'une installation d'éclairage. En effet, le coût énergétique peut être réduit en utilisant des lampes à haute efficacité lumineuse.

Les lampes à incandescence sont indiquées pour un espace limité ou lorsqu'il est nécessaire de fournir un puissant faisceau lumineux concentré (éclairage d'appoint, par exemple). Les deux principales catégories de lampes à incandescence - *standard* et aux *halogènes* - présentent les avantages et limites suivants :

Pour les lampes ordinaires (standard) :

- faible coût
- prédominance des couleurs chaudes
- luminance élevée
- excellent rendu des couleurs
- faible efficacité lumineuse
- durée de vie réduite (1 000 heures), affectée par les variations de tension d'alimentation
- effet thermique important.

Pour les lampes tungstène halogène :

- efficacité lumineuse élevée
- volume réduit, luminance élevée
- durée de vie élevée (2 000 heures)
- excellent rendu des couleurs
- maintien du flux lumineux pendant toute la durée de vie
- risques pour les yeux en éclairage direct sans verre de protection.

1.1.2.2. Lampes fluorescentes

Les lampes fluorescentes sont constituées d'un tube de verre dont la face interne est revêtue d'une couche de substances fluorescentes. Le tube est rempli d'un gaz rare sous faible pression. Les substances fluorescentes sont excitées par le rayonnement ultraviolet produit lors du passage du courant électrique dans la colonne gazeuse. L'installation de l'éclairage fluorescent est plus onéreuse que l'incandescence mais son utilisation est plus économique; les lampes fluorescentes ont une luminance plus faible et dégagent moins de chaleur. Elles sont principalement utilisées dans l'éclairage extérieur, magasins, bureaux et ateliers. A cause de leur puissance lumineuse insuffisante, les tubes fluorescents ne sont pas indiqués pour des ateliers de grande hauteur. Les principales particularités des lampes fluorescentes sont les suivantes:

Pour les lampes fluorescentes tubulaires :

- coût d'exploitation économique
- longue durée de vie (8 000 heures)
- efficacité lumineuse élevée

- bon rendu de couleur.

Pour les lampes fluorescentes compactes :

- coût d'exploitation économique
- longue durée de vie (8 000 heures)
- bonne efficacité lumineuse.

1.1.2.3. Lampes à décharge

Les lampes à décharge sont constituées d'un tube de verre ou de quartz contenant une ou plusieurs vapeurs métalliques (sodium ou mercure) et rempli de gaz rare. Il existe une grande variété de lampes (ballon fluorescent, halogénures métalliques, sodium haute ou basse pression, etc.) ; leur qualité et efficacité lumineuse diffèrent d'une catégorie à l'autre. Les lampes à décharge sont indiquées pour l'éclairage de grandes espaces (halls, chaufferies, fonderies, ateliers de laminage).

Pour les lampes à ballon fluorescent à vapeur de mercure :

- longue durée de vie (8 000 heures)
- bonne efficacité lumineuse
- rendu de couleur acceptable en industrie

Pour les lampes aux halogénures métalliques :

- haute efficacité lumineuse
- bon rendu de couleur

Pour les lampes à vapeurs de sodium :

- longue durée de vie (8 000 à 12 000 heures)
- médiocre rendu de couleur

Les différentes informations ci-dessus sont regroupées dans le tableau 12.1.

1.1.3. Evolution des caractéristiques

Au cours des dix dernières années, les sources lumineuses ont été progressivement améliorées. Cette évolution c'est manifestée par :

- une augmentation de l'efficacité lumineuse
- une amélioration de la qualité de la lumière
- une augmentation de la durée de vie des lampes
- une réduction des dimensions des lampes [37].

Type de lampe	Puissance (W)	Température de couleur (K)	Rendu de couleur (IRC)	Efficacité lumineuse (lm.W ⁻¹)	Durée de vie (heures)	Utilisation principale de l'éclairage
A incandescence						
<i>Standard</i>	40 à 1 000	2 700	100	11 à 19	1 000	Domestique Eclairage localisé Décoratif
<i>Tungstène halogène</i>	60 à 500	3 000	100	13 à 20	2 000	Eclairage local Bureaux Projection concentrée
Fluorescente						
<i>Rectilignes</i>	18 à 58	2 700 - 6 500	50 à 85	64 à 93	8 000	Extérieur Magasins Bureaux Ateliers
<i>Compactes</i>	5 à 55	2 700 - 4 000	85	44 à 87	8 000	Multiples
A décharge						
<i>Ballon fluorescent</i>	50 à 1 000	3 000 - 4 000	45 à 60	36 à 60	8 000	Hangars Ateliers de grande hauteur Halls
<i>Halogénures métalliques</i>	35 à 2 000	2 800 - 6 000	70 à 93	62 à 100	6 000	Grands espaces Halls de grande hauteur
<i>Sodium (haute pression)</i>	35 à 1 000	1 700 - 2 500	≅ 80	46 à 138	8 000	Extérieur Grands halls
<i>Sodium (basse pression)</i>	18 à 180	monochromatique		100 à 180	12 000	Atmosphère chargée de fumées, de vapeur, de poussières

Tableau 12.1 : Caractéristiques comparées de divers types de lampes [4]

2. Luminaires

Les *luminaires* sont des appareils d'éclairage destinés à modifier la distribution lumineuse et la luminance des lampes. Ils remplissent également une fonction esthétique en contribuant à l'ambiance décorative du local.

2.1. Structure fonctionnelle des luminaires

Un luminaire est un ensemble constitué d'un système *optique*, d'un appareillage

mécanique pour fixer et protéger les lampes et *électrique* pour les relier aux circuits d'alimentation.

- La composante *optique* peut comporter une ou plusieurs *lampes* et des dispositifs qui diminuent la luminance et modifient la direction des rayons lumineux par réflexion, réfraction et diffusion.
- La composante *mécanique* inclut des dispositifs de protection des lampes et des accessoires de fixation de l'ensemble et des accessoires électriques.

- La composante *électrique* comprend des dispositifs auxiliaires d'allumage (amorçeur, starter), d'alimentation (balast, transformateur, condensateur) et de raccordement au réseau d'alimentation électrique.

2.2. Critères de choix des luminaires

Le choix des luminaires pour l'éclairage d'un local est déterminé en premier lieu par des critères *optiques*, en relation avec les exigences visuelles, ensuite par des considérations *économiques*, *technologiques* et *esthétiques*. Enfin, les critères de sécurité constituent une condition *sine qua non* du choix. En effet, les luminaires doivent garantir une *sécurité* maximale - mécanique, électrique et thermique - aux utilisateurs conformément aux normes spécifiques européennes (série EN 60598), reprises dans les normes françaises NF EN 60598).

Les luminaires destinés à éclairer un environnement de travail doivent remplir plusieurs conditions :

- *Optiques* : fournir des conditions optimales d'éclairage quantitatif (niveau) et qualitatif (confort, absence d'éblouissement) exigées par l'activité professionnelle,

- *Technologiques* : présenter une bonne résistance aux chocs mécaniques et thermiques, facilité de pose et d'entretien,
- *Economiques* : rapport acceptable entre les qualités des luminaires et le coût d'exploitation,
- *Esthétiques* : en relation avec la nature du local, les luminaires peuvent contribuer à rendre agréable l'environnement de travail.

2.3. Dépréciation des installations

Le niveau et la qualité d'un système d'éclairage diminue progressivement dans le temps. Les principales causes de cette dégradation sont :

- la baisse du flux lumineux des lampes à la suite de leur vieillissement ;
- la défaillance de certaines lampes ;
- l'empoussièrement des surfaces des lampes et des luminaires ;
- l'empoussièrement des parois du local qui réduit le facteur de réflexion des surfaces et partant, la quantité de lumière réfléchi.

Les conditions de dépréciation varient selon le type de lampe et de luminaire, la nature de l'activité exercée dans le local, la fréquence des nettoyages et des rechanges.

FICHE n°13

FATIGUE VISUELLE

1. Fatigue visuelle - problème de santé

L'intégration des nouvelles technologies de visualisation au poste de travail a augmenté l'efficacité et la productivité mais au prix d'un accroissement de la charge visuelle de travail. En effet, des enquêtes épidémiologiques montrent que le travail sur écran de visualisation s'accompagne de nombreuses plaintes témoignant d'une **fatigue visuelle** [28 ; 26 ; 11 ; 12]. L'incidence des symptômes d'inconfort et d'astreinte oculaire et visuelle est plus élevée parmi les personnes qui travaillent avec écran de visualisation que sans écran [69 ; 76].

L'augmentation de la charge visuelle des personnes qui travaillent sur écran s'explique par l'intervention de plusieurs facteurs [41] :

- sollicitation permanente des fonctions visuelles (accommodation, convergence, adaptation) au cours de la lecture et de la recherche de l'information sur écran ;
- sollicitation des processus attentionnels, perceptifs et cognitifs en relation avec l'information présentée sur écran ;
- accroissement du nombre de tâches de routine, monotones, répétitives, peu motivantes souvent sous contrainte temporelle ;
- insuffisances ergonomiques dans l'aménagement de l'environnement lumineux et du poste de travail ;
- restriction des capacités visuelles des opérateurs (âge, défauts visuels non corrigés ou mal corrigés..).

Le travail sur écran comporte donc une charge visuelle importante qui engendre des troubles fonctionnels considérés comme des manifestations de fatigue visuelle.

A ce propos, il convient de mentionner que les plaintes portant sur la gêne et l'inconfort visuel ne constituent pas un phénomène spécifique au travail sur écran. En effet, des symptômes de fatigue visuelle ont été également constatés chez d'autres catégories

d'opérateurs qui effectuent un travail en vision rapprochée tel que le travail avec des aides optiques, la lecture de microfiches, le contrôle de qualité... [79 ; 117 ; 36].

Avec le développement de l'informatisation et l'augmentation considérable du nombre de postes de travail sur écran, et avec l'ampleur des troubles oculaires et visuels des opérateurs, le problème de la fatigue visuelle prend une dimension particulière. En effet, la fatigue visuelle devient un **problème de santé** lorsqu'elle :

- apparaît précocement pendant le travail,
- entretient un état de gêne et d'inconfort,
- limite et altère la capacité de travail et les performances visuelles,
- augmente les risques d'erreurs.

En absence de mesures préventives, les symptômes de fatigue s'intensifient, le temps de récupération s'accroît et les signes subjectifs et objectifs de décompensation psychophysiologique se manifestent non seulement dans l'environnement de travail, mais aussi dans la vie hors travail.

2. Fatigue générale et fatigue visuelle

2.1. Fatigue générale

Le terme *fatigue* se réfère à la fois à une *expérience subjective* - sensations de fatigue générale ou localisée - et à une *baisse d'activité* ; ces phénomènes sont *réversibles* lors de la cessation transitoire de l'activité [109]. Les diverses définitions de la fatigue soulignent à la fois les manifestations et les mécanismes présumés. Ainsi :

- la fatigue a été définie comme une diminution temporaire et réversible de l'excitabilité et du pouvoir fonctionnel des structures contrôlés par le système nerveux central ; elle est consécutive, et liée par nature, à leur fonctionnement [8] ;
- la fatigue est attribuée à une diminution temporaire de la capacité de réponse des *récepteurs* et d'*effecteurs* à une stimulation continue [116] ;
- selon ses manifestations, il est possible de mettre en évidence une fatigue

musculaire, sensorielle (auditive, visuelle) ou *nerveuse* [18] ;

- selon sa persistance, une fatigue *aiguë*, qui disparaît avec le repos, a été distinguée de la fatigue *chronique* qui témoignerait d'un état de stress [23].
- la fatigue peut être interprétée comme une forme de *conflit* entre l'obligation d'exécuter un travail et l'aversion de l'effort [56], un signal d'alarme qui prévient l'épuisement, une réaction de défense contre le surmenage [18].

2.2. Fatigue visuelle

Le terme de *fatigue visuelle*, d'*astreinte visuelle* ou d'*asthénopie* désigne un ensemble de phénomènes *psychophysiologiques* subjectifs et objectifs, comportementaux et physiologiques qui témoignent d'un *affaiblissement des fonctions visuelles sensorielles et/ou motrices* ; ces phénomènes, engendrés par un travail à prédominance visuelle, sont *réversibles* avec le repos.

3. Manifestations subjectives et objectives de fatigue visuelle

3.1. Phénomènes subjectifs

Au plan subjectif, la fatigue visuelle se manifeste par des symptômes oculaires, visuels et généraux [85 ; 10 ; 127] :

- Les symptômes de gêne et d'inconfort *oculaire* s'expriment par des sensations de *tension*, de *lourdeur* ou de douleur des globes oculaires, des *picotements*, des *brûlures*, des *démangeaisons* palpébrales, accompagnés parfois de larmoiements et de *rougeurs* des conjonctives.
- Les signes d'inconfort *visuel* se manifestent par un *affaiblissement* de la vision de près ou de loin (image *trouble*, *double* ou vacillante), des sensations de *papillotement* ou d'éblouissement, une *sensibilité accrue à la lumière*, une difficulté de fixation et, plus rarement, l'apparition d'un *voile* sur les objets fixés, des taches sombres ou des franges colorées autour des objets.
- Les symptômes généraux incluent surtout les *céphalées* frontales, plus rarement des *vertiges*.

3.2. Indices physiologiques de fatigue visuelle

Le travail visuel prolongé engendre une *détérioration temporaire et réversible des propriétés fonctionnelles du système visuel* qui se traduit par une diminution des capacités visuelles (accommodation, sensibilité au contraste, acuité visuelle...). Ces modifications sont considérées comme des indices physiologiques de fatigue visuelle [21].

3.2.1. Accommodation

L'*accommodation* définit la propriété du système visuel à focaliser l'image d'un objet sur la région fovéale de la rétine. Les troubles d'accommodation constituent un des indices pertinents de fatigue visuelle. Ainsi,

- Le *punctum proximum* d'accommodation (PPA) augmente après une activité qui sollicite intensément la vision, tel que le travail sur microfiches, microscope ou écran de visualisation, inspection et contrôle de qualité [117; 75 ; 35 ; 102]. L'augmentation du PPA s'observe également chez les employés de bureau en fin de journée [87].
- Le point de focalisation dans l'obscurité (*dark focus*) se rapproche de l'oeil après 2 heures de lecture sur écran ou sur papier [90 ; 63].
- La *précision de la focalisation* diminue après 2 heures de contrôle du trafic aérien sur écran [88] et 6 heures de travail de saisie de données [48].
- Le *temps d'accommodation* dans le passage d'un point éloigné à un point rapproché et vice-versa s'allonge avec le temps de travail sur écran de visualisation [84].
- L'*amplitude* de l'accommodation (distance entre le PPA et le *punctum remotum*) diminue en fonction de la durée du travail [113].
- Une *myopie transitoire* apparaît assez fréquemment après 2 heures de travail en vision rapprochée [61 ; 89].

3.2.2. Sensibilité au contraste

La *sensibilité au contraste* définit la capacité des récepteurs rétiniens à détecter de faibles variations de luminance dans le champ visuel.

La sensibilité au contraste diminue ou présente des fluctuations lorsqu'un travail visuel se prolonge au-delà de 30 minutes [49]. De même, lors d'une tâche de contrôle de données sur écran, le seuil de contraste diminue significativement avec le temps de travail [106]. La diminution de la sensibilité au contraste affecte les performances visuelles dans des tâches de lecture sur papier ou écran, dans la détection de cibles, etc. [78 ; 83 ; 124].

3.2.3. Acuité visuelle

L'*acuité visuelle* est la capacité de l'oeil à distinguer des détails fins. L'acuité visuelle diminue après 1 à 3 heures de travail visuel [52 ; 45 ; 90], mais cette baisse n'est pas systématique.

3.2.4. Résistance à l'éblouissement

La *résistance à l'éblouissement* se manifeste par la rapidité de récupération des capacités visuelles après une courte exposition à une luminance excessive.

La fatigue visuelle engendre une diminution de la résistance à l'éblouissement [80]. Cela augmente le risque d'accidents dans la conduite nocturne sur la route et perturbe la performance dans certains métiers (acteurs, pompiers) [122].

3.2.5. Diamètre pupillaire

Le diamètre de la pupille augmente dans l'obscurité et diminue à la lumière. Dans les mêmes conditions d'éclairage, le diamètre de la pupille diminue lors de la mise au point des objets situés à proximité.

Une sollicitation prolongée de la vision de près lors de la lecture sur microfiches ou sur écran de visualisation provoque une diminution persistante du diamètre pupillaire [113].

Observations

Un effort mental, l'émotion ou un état de stress s'accompagnent souvent d'une dilatation de la pupille ; en tant qu'indices de fatigue visuelle, les variations du diamètre pupillaire sont alors difficiles à interpréter.

3.2.6. Mouvements oculaires, vergence, phories

La fatigue visuelle comporte un affaiblissement des fonctions oculomotrices qui se manifeste par :

- une diminution de l'amplitude et augmentation de la latence des saccades et un ralentissement des mouvements de poursuite oculaires [130] ; la performance dans des tâches de recherche, de localisation et d'identification des informations visuelles diminue ;
- un éloignement du *punctum proximum de convergence*¹ lors d'un travail intensif de lecture sur papier, microfiches, microscope ou écran [75 ; 86 ; 73].
- un déséquilibre du tonus des muscles oculomoteurs (*hétérophories*). Ainsi, le balayage fréquent écran-document ainsi que la lecture prolongée sur papier ou écran s'accompagnent d'une déviation des globes oculaires vers l'intérieur (*ésophorie*) ou vers l'extérieur (*exophorie*). Ce déséquilibre peut se manifester par une décompensation de la vision binoculaire (*diplopie*), des erreurs de jugements dans l'appréciation des distances et de la position des objets, surtout lorsque ceux-ci sont en mouvement [129; 34].

Observations

Les hétérophories augmentent le risque d'accidents dans la conduite de nuit d'engins de transport et d'avions. Lors de l'atterrissage, l'ésophorie se manifeste par une tendance à se poser "sous la piste", l'exophorie et l'insuffisance de convergence par une tendance à rester trop haut [122].

3.2.7. Clignements palpébraux

La fréquence des *clignements* palpébraux augmente après 1 à 3 heures de travail en vision rapprochée. Cet effet s'observe surtout au cours des tâches répétitives.

3.2.8. Fréquence critique de fusion

La fréquence minimale des stimuli lumineux intermittents qui sont perçus comme une

¹ *Punctum proximum de convergence* : point le plus proche permettant d'obtenir une image non dédoublée.

lumière continue est appelée *Fréquence Critique de Fusion (FCF)*.

La FCF diminue après 1 à 3 heures de travail dans des tâches d'inspection, de lecture sur papier ou écran, surveillance radar... [102 ; 3].

Observations

L'abaissement du seuil de fusion des stimuli lumineux intermittents est considéré à la fois comme un signe de fatigue visuelle et de fatigue nerveuse [123].

3.2.9. Potentiels évoqués visuels

Lorsque la charge visuelle augmente, l'amplitude des composantes précoces du potentiel évoqué visuel (PEV)² diminue et la latence augmente [131].

En conclusion, la fatigue visuelle se manifeste souvent par une diminution des capacités visuelles, évaluées au moyen de mesures ophtalmologiques mais la fiabilité des divers indices est inégale. D'après Cail et Salsi [21] :

- les tests d'*accommodation*, de *vergence*, et de *sensibilité au contraste* sont considérés comme fiables pour le diagnostic de la fatigue visuelle ;
- les mesures d'*acuité visuelle*, des *phories* et des *mouvements oculaires* fournissent certaines indications sur la fatigue mais sont moins fiables que les précédents ;
- les variations du *diamètre pupillaire*, du nombre de *clignements* palpébraux et de la *FCF* ne sont pas spécifiques de la fatigue visuelle ; en effet, elles s'observent également dans un état de fatigue générale ou de stress.

3.3. Performances perceptives

La fatigue visuelle peut se manifester par une diminution d'efficacité ; il s'agit d'une dégradation quantitative ou qualitative de la performance au bout d'une certaine période de travail. Ainsi, la précision et la rapidité des réponses dans des tâches de surveillance qui comportent la détection, l'identification et la localisation des signaux visuels, diminue ou présente des fluctuations. Toutefois, il convient de rappeler que le déclin de la performance dans des tâches monotones, répétitives (inspection, contrôle de qualité) avec le temps de travail est associée à une diminution du niveau de vigilance [cf. 29].

² Potentiel évoqué visuel (PEV) : activité électrique phasique des structures neuronales occipitales en réponse aux stimuli lumineux.

Par conséquent, *la diminution des performances perceptives peut être due à une fatigue visuelle et/ou à une diminution du niveau de vigilance.*

En ce qui concerne des tâches plus complexes (compréhension de la lecture, par exemple), il est difficile de préciser la part respective de l'influence de la fatigue visuelle, perceptive ou cognitive dans la diminution de performance. Toutes conditions égales par ailleurs, la motivation peut masquer l'effet de la fatigue sur la performance.

4. Facteurs qui déterminent et favorisent la fatigue visuelle

4.1. Charge visuelle de travail

La charge visuelle dépend des exigences perceptives de la tâche et des facteurs environnementaux de contrainte ; elle peut varier également en fonction des capacités de l'opérateur [41]. La fatigue visuelle est une conséquence physiologique des activités qui sollicitent d'une manière intensive et prolongée les fonctions visuelles [119] ; elle apparaît plus fréquemment lorsque le système visuel doit travailler aux limites de ses capacités ou/et pendant une longue durée. De plus, les facteurs de contrainte résultant des *insuffisances ergonomiques* (mauvais éclairage, aménagement inadéquat du poste de travail, etc.) demandent un effort supplémentaire et contribuent à la *surcharge* visuelle [81 ; 107 ; 108]. Enfin, certains facteurs individuels peuvent également accélérer l'apparition des symptômes de fatigue visuelle et favoriser la "fatigabilité" de l'appareil visuel.

4.2. Environnement lumineux

Les symptômes de fatigue visuelle sont provoqués ou intensifiés par un éclairage quantitatif ou qualitatif inadéquat à la tâche [74 ; 115 ; 44 ; 110 ; 112]. En effet,

- un faible éclairage diminue la lisibilité des documents,
- un éclairage non uniforme du plan de travail demande un effort accru pour détecter les erreurs lors des tâches d'inspection,
- des rapports de luminance excessifs dans le champ visuel, rendent difficile la lecture sur écran ou documents,

- des réflexions spéculaires ou diffuses affectent la visibilité de la tâche.

4.3. Présentation de l'information visuelle

Lorsque l'information présentée sur document-papier, écran ou autre support est difficile à déchiffrer, l'opérateur est obligé à faire un effort supplémentaire pour effectuer sa tâche. Ainsi, la charge visuelle augmente-t-elle lorsque les manuscrits sont de mauvaise qualité (caractères illisibles ou trop petits, écriture au crayon, papier glacé...). Dans le travail sur écran, une faible résolution de l'écran et une mauvaise qualité de l'affichage de l'information (manque de netteté des caractères, vitesse élevée d'affichage, densité du texte, papillotement de l'écran, faible contraste) contribuent à l'astreinte visuelle [118 ; 10 ; 53].

4.4. Exigences visuelles de la tâche

Les principaux facteurs de contrainte sont à la fois la difficulté de focaliser et de fixer une cible mobile et de détecter l'information pertinente. Ces facteurs agissent dans le travail avec des aides optiques et sur microfiches ; la fatigue visuelle se manifeste fréquemment lors des tâches d'exploration, d'inspection et de lecture [27 ; 72 ; 128]. De même, dans le travail sur écran de visualisation, la fatigue apparaît plus précocement au cours des tâches de saisie, d'acquisition de données et de correction, dans la recherche d'information sous contrainte de temps [100].

4.5. Aménagement du poste de travail

Un poste de travail inconfortable ou mal adapté aux caractéristiques anthropométriques de l'opérateur est souvent à l'origine de problèmes posturaux. De plus, une distance inadéquate oeil-tâche demande un effort supplémentaire d'accommodation. La fatigue oculaire s'ajoute alors à la fatigue posturale.

4.6. Organisation du travail

La fréquence des symptômes subjectifs de fatigue visuelle augmente en fonction de la *durée* du travail ininterrompu, de la *contrainte de temps* et plus particulièrement

lorsqu'il s'agit d'un même type de tâche (acquisition et saisie de données, travail avec microscope, lecture sur microfiches...) [96 ; 67 ; 39 ; 40 ; 114 ; 20].

4.7. Facteurs individuels

4.7.1. Défauts visuels

Des défauts visuels non corrigés tels que l'astigmatisme, les troubles d'accommodation ou l'hétérophorie contribuent à l'apparition précoce des symptômes de fatigue visuelle [82 ; 51 ; 99].

4.7.2. Port de verres correcteurs

La fréquence des symptômes subjectifs de fatigue est plus élevée chez les porteurs de lunettes que chez les non porteurs [91 ; 95]. Toutefois, dans la première catégorie, il convient de distinguer les personnes qui bénéficient d'une correction adéquate à leur travail de celles qui sont mal corrigées. Ainsi, le travail sur écran exige le port de verres qui permettent à la fois la lecture des documents et la recherche d'information ou la lecture sur écran ; assez souvent, la correction pour la distance de travail oeil-écran est inadéquate.

4.7.3. Age

La fréquence des symptômes de fatigue augmente chez les personnes dont l'âge est supérieur à 45 ans. La diminution des capacités visuelles avec l'âge (presbytie, sensibilité accrue à l'éblouissement, etc.) augmente la vulnérabilité du système visuel des personnes âgées aux conditions d'éclairage et de présentation de l'information sur écran [54 ; 55].

4.7.4. Etat fonctionnel

L'insomnie, la prise d'alcool ou de certains médicaments, les troubles métaboliques, hormonaux ou neuropsychiques contribuent à l'apparition d'une fatigue précoce [31].

5. Valeur et limites des indices physiologiques de fatigue visuelle

Divers auteurs ont tenté "d'objectiver" la fatigue visuelle ; les résultats de ces tentatives sont souvent contradictoires. En

effet, les fonctions visuelles ne sont systématiquement dégradées, les corrélations entre les données objectives et subjectives sont faibles ou inexistantes. Ces résultats contradictoires s'expliquent à la fois par la *diversité des conditions expérimentales* ou des *techniques ophtalmologiques* utilisés dans différentes études et par les *insuffisances méthodologiques* propres aux tests de fatigue.

Dès lors, il ne s'agit pas de contester l'existence d'une fatigue visuelle engendrée par un travail visuel exigeant et prolongé ; il ne s'agit non plus de contester le rôle des mauvaises conditions "visuelles" du travail qui favorisent l'apparition précoce de la fatigue. Il s'agit surtout de connaître et si possible, d'éliminer, lors d'un examen ophtalmologique, les facteurs "non visuels" susceptibles d'influencer la variable physiologique mesurée.

5.1. Pertinence des indices objectifs de fatigue visuelle

La pertinence des indices physiologiques de fatigue visuelle dépend de leur *sensibilité*, *fidélité*, *validité* et *spécificité*. Cette dernière condition est loin d'être satisfaite par les mesures ophtalmologiques courantes car certains indices varient avec de facteurs indépendants de la fatigue visuelle. Ainsi, le *diamètre pupillaire* se réduit avec l'âge, le manque de sommeil ou la baisse de vigilance; l'émotion ou l'effort attentionnel s'accompagnent d'une dilatation de la pupille [65]. Le *punctum proximum d'accommodation* (PPA) présente un rythme circadien et varie avec l'âge, la distance oeil-écran et la couleur des caractères [111]. Les *mouvements oculaires* sont influencés par le nyctémère, le bruit augmente la latence des saccades, la fréquence de *clignements* diminue avec l'âge, l'équilibre des muscles oculaires (*phories*) présente de grandes différences intra et interindividuelles. L'*acuité visuelle* et la *sensibilité au contraste* sont influencées par l'ambiance thermique, la sécheresse de l'air et le papillotement des caractères affichés à l'écran.

Ces quelques exemples aident à comprendre les discordances entre les résultats des mesures ophtalmologiques et incitent à un *contrôle* plus rigoureux des facteurs de

variation non reliés au travail visuel proprement dit.

5.2. Insuffisances méthodologiques

La technique courante d'évaluation de la fatigue visuelle consiste à comparer les résultats des mesures ophtalmologiques effectuées *avant* et *après* une certaine période de travail. Cependant, la technique avant/après présente des insuffisances méthodologiques qui limitent considérablement leur valeur diagnostique. En effet,

- Dans la plupart des cas, les conditions dans lesquelles les fonctions visuelles sont testées diffèrent de celles du travail. Les différences concernent l'environnement lumineux, le contraste, la distance de vue, la taille des stimuli-test, les tâches visuelles, l'état psychophysiologique du sujet.
- La sollicitation du système visuel au cours des examens ophtalmologiques diffère de celle exercée par les caractéristiques de la tâche. Ainsi, chaque test mesure de façon *statique* les différentes fonctions visuelles *isolées* tandis que le travail réel sur écran intègre de façon *dynamique* ces fonctions en vue d'effectuer une tâche pour une certaine période de temps.
- La vitesse de récupération fonctionnelle varie d'un indice à l'autre. Ainsi, la myopie transitoire persiste 1,5 à 7 minutes après l'arrêt du travail et disparaît après 10 à 15 minutes de repos tandis que l'allongement du *punctum proximum d'accommodation* peut persister plusieurs heures après l'arrêt du travail [61].
- Toute interruption d'une activité par l'insertion d'un test modifie l'état fonctionnel de l'individu et le test devient automatiquement invalide [17].
- Les mesures avant/après ne fournissent pas d'information sur le décours temporel des modifications fonctionnelles. Il est donc impossible de détecter l'apparition et de suivre l'évolution de différents signes de fatigue au cours du travail.
- Les résultats des mesures avant/après ne peuvent pas être mis en relation avec les variations des performances visuelles ou perceptives dans le temps. Or, en termes d'efficacité, il convient de détecter les

signes de fatigue avant que la performance ne soit affectée. Lorsqu'il est envisagé de détecter des signes précoces de fatigue, les variations des indices de fatigue doivent être mesurées pendant le travail.

- La dégradation des performances perceptives peut constituer un indice objectif de fatigue visuelle. Toutefois, la validité de cet indice est assez faible car dans des conditions réelles de travail, il est difficile de contrôler la stabilité de la stimulation tout au long du travail et la motivation de l'opérateur.

6. Mécanismes de la fatigue visuelle

Les symptômes de fatigue visuelle traduisent une dégradation des propriétés fonctionnelles du système visuel. Ce dysfonctionnement concerne à la fois les composantes périphériques - motrices et sensorielles - de l'oeil et les structures neuronales centrale qui contrôlent et intègrent les messages visuels.

6.1. Fatigue musculaire

Il a été supposé que la fatigue visuelle résulte d'une surcharge des muscles extra- et intra-oculaires laquelle entraîne une difficulté à focaliser et à maintenir l'image sur la rétine fovéale [126 ; 88 ; 89 ; 92]. Cette hypothèse est soutenue par les recherches qui montrent des troubles de l'*accommodation* et de la *convergence*³ après un travail sur écran (recul du PPA, réduction de l'amplitude de l'*accommodation*, l'éloignement du *punctum proximum* de convergence). De même, les modifications de la durée, de l'amplitude et de la latence des saccades traduiraient un dysfonctionnement musculaire.

6.2. Fatigue sensorielle

Il a été également supposé que la fatigue visuelle serait due à une sur-sollicitation des

récepteurs rétiniens⁴. En faveur de l'hypothèse d'une fatigue sensorielle plaident les expériences qui montrent une *diminution de la sensibilité au contraste* ainsi que des variations du seuil de contraste lors d'un travail visuel [124 ; 106]. Une *diminution de la résistance à l'éblouissement* témoigne également d'un dysfonctionnement au niveau des récepteurs rétiniens.

6.3. Fatigue centrale

La fatigue visuelle est à la fois une fatigue sensorielle, musculaire et nerveuse. En effet, en *conditions physiologiques*, le système nerveux intervient dans le contrôle réflexe et volontaire de la motricité oculaire, dans le contrôle "en retour" de l'excitabilité des récepteurs sensoriels et musculaires et dans le traitement de l'information visuelle. En *conditions de surcharge* du système visuel, l'équilibre entre sollicitations et capacités visuelles devient instable, les ajustements périphériques sont insuffisants et la performance ne peut être maintenue qu'au prix d'un effort supplémentaire.

Les sensations d'astreinte oculaire et visuelle reflètent, sur le plan subjectif, l'irritation des récepteurs sensitifs de l'oeil et l'effort excessif des muscles oculaires. Selon Duke-Elder et Abrams [32], les efforts conscients d'ajustements de l'appareil visuel "pour voir clair" sont à l'origine des sensations d'astreinte oculaire.

En résumé, la fatigue visuelle s'explique par l'intervention de plusieurs mécanismes : dégradation des propriétés fonctionnelles des muscles oculaires, des récepteurs visuels et des processus nerveux intégratifs. A ceux-ci s'ajoutent des phénomènes d'irritation qui peuvent être consécutifs aux défaillances sensori-motrices.

Sur le plan pratique, la plupart des indices objectifs de fatigue renseignent sur les défaillances de l'appareil musculaire de l'oeil lors d'un effort d'*accommodation* et de *convergence*. Cependant, un affaiblissement des propriétés fonctionnelles des récepteurs (*sensibilité au contraste*, *adaptation* aux variations de

³ Selon Rey et Meyer [1981] le terme d'*asthénopie* est synonyme de fatigue *accommodative* ; il inclut parfois la fatigue de la *convergence*.

⁴ Le terme d'*asthénopie rétinale* a été utilisé pour définir un état d'épuisement de la sensibilité rétinienne induit par un effort visuel prolongé.

luminance, pouvoir de résolution) peut être à l'origine des troubles d'accommodation. Enfin, les fluctuations du niveau d'*activation cérébrale* sont souvent associées aux détériorations des performances perceptives.

7. Prévention

L'objectif de la prévention n'est pas d'éliminer la fatigue en général ou la fatigue visuelle en particulier dans la mesure où il s'agit d'une conséquence normale d'un travail effectué en conditions ergonomiques. En revanche, des mesures préventives s'imposent lorsqu'il s'agit d'une fatigue visuelle qui traduit un dysfonctionnement précoce et répété du système visuel. Il est également nécessaire de mettre au point une méthodologie fiable d'évaluation de la fatigue visuelle. Ceci implique la recherche des mécanismes de la fatigue visuelle, l'élaboration des méthodes de dépistage et leur validation sur terrain.

7.1. *Recommandations ergonomiques*

Selon Pheasant [92], la conception de l'environnement visuel de travail et des tâches visuelles sont importantes parce que : (a) les éléments visuels de la tâche déterminent la posture de la tête et de la nuque ; (b) les exigences visuelles du travail et/ou les mauvaises conditions visuelles sont génératrices de fatigue visuelle ; (c) la visibilité, la lisibilité et l'intelligibilité des composantes visuelles de la tâche peuvent avoir une influence pertinente sur l'efficacité et la sécurité.

Lors des interventions sur le terrain, il convient donc d'exploiter les acquis sur les facteurs qui déterminent ou favorisent la détérioration des fonctions visuelles. Les nombreuses causes de la fatigue visuelle peuvent être classées en trois catégories : "mauvais" éclairage, "mauvais" travail, "mauvais yeux" [68]. Il s'agit alors d'appliquer les recommandations concernant *l'environnement lumineux*, *l'organisation du travail* et *l'intégrité de l'appareil visuel* de l'opérateur.

7.1.1. Environnement lumineux

L'éclairage doit être adapté à chaque type de travail, à chaque poste de travail, voire à

chaque travailleur [77]. Il convient alors de connaître les répercussions d'un éclairage inadéquat sur le fonctionnement du système visuel afin de corriger les défauts :

- Lorsque *le niveau d'éclairement de la tâche* est trop faible, l'ajustement continu des muscles peut amener le mécanisme de focalisation à travailler aux limites ; un éclairage trop élevé, sollicite en excès le muscle constricteur de la pupille ; lorsqu'il existe des défauts du système visuel, un niveau d'éclairement élevé peut devenir perturbateur.
- *Les réflexions* diffuses peuvent voiler la tâche et masquer les détails. *L'éblouissement perturbateur* provoqué par des luminances élevées proches de la ligne de vision peut avoir un effet similaire.
- Lorsqu'il existe une *différence d'éclairement entre la zone de travail et les zones adjacentes* et la *luminance* de la zone adjacente est plus élevée que celle de la zone de travail, le système visuel est soumis à des contraintes excessives (adaptation de la rétine, ajustement du diamètre pupillaire).
- Des *points de luminance élevée* apparaissant dans le champ visuel peuvent distraire *l'attention* du sujet même si leur luminance est insuffisante pour provoquer un éblouissement perturbateur.
- Lorsque le *rapport des luminances* entre écran et document est trop grand, le système visuel est soumis à des ajustements excessifs.

En conclusion, la sollicitation excessive des fonctions visuelles peut être évitée en ajustant le niveau d'éclairement et la distribution de la lumière aux exigences de la tâche et aux aptitudes visuelles de l'opérateur.

7.1.2. Organisation du travail

Une organisation ergonomique du travail peut contribuer à prévenir la fatigue visuelle. Les recommandations concernent surtout l'aménagement des pauses et des horaires de travail, l'alternance des tâches à prédominance visuelle et des tâches moins contraignantes pour la vision [20 ; 39 ; 127].

Observations

Sur le plan de la prévention, il convient de savoir que chaque erreur dans la conception du poste ou du travail informatisé contribue de façon directe ou indirecte à la surcharge de travail, au stress et à la fatigue. Il convient alors de prendre en compte tous les facteurs susceptibles de provoquer l'inconfort et l'astreinte, même si chacun des facteurs considéré séparément semble insignifiant [9].

7.2. Surveillance médicale

Le contrôle périodique de l'état visuel des opérateurs constitue une pratique courante. Toutefois, la correction des défauts visuels doit être adaptée à la tâche. L'investigation de la fatigue visuelle sur le terrain implique des examens répétés des fonctions visuelles.

7.3. Méthodologie

La recherche des mécanismes de la fatigue visuelle est intimement liée à l'élaboration

des moyens adéquats pour l'évaluer. [66 ; 21 ; 19]. En effet, lorsqu'il s'agit de préciser la composante (*motrice* ou *sensorielle*) du système visuel affectée de façon dominante par la fatigue, il convient d'utiliser un moyen qui soit sensible aux variations de la fonction présumée.

Lorsqu'il s'agit de dépister des signes *précoces* de fatigue, il convient d'intégrer les tests fonctionnels dans une tâche réelle et de maintenir le même niveau d'exigence tout au long du travail. Lorsqu'il s'agit de préciser les relations entre la fatigue "centrale" et "périphérique", il convient de mesurer les variations des indices spécifiques (visuels) et non spécifiques (électrophysiologiques ou biochimiques) pendant le travail, etc.

Une approche "globale" de la fatigue visuelle au moyen de tests dynamiques, appliqués *pendant* le travail, peut faciliter la mise en évidence et le suivi des variations fonctionnelles témoignant d'une fatigue périphérique - sensorielle et motrice - et centrale.

FICHE n° 14

EFFETS PHOTOBIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS OPTIQUES

1. Photobiologie et photothérapie

Source naturelle de rayonnement visible, le soleil est également une source de rayonnement invisible - ultraviolet (UV) et infrarouge (IR). En effet, de toutes les radiations solaires, seuls les rayonnements non ionisants UV, visible et IR - dont l'ensemble est appelé *rayonnement optique* - arrivent jusqu'à la surface terrestre. Absorbés par les structures spécifiques de l'organisme, les rayonnements optiques donnent naissance à des réactions chimiques et physiques qui ont des effets biologiques chez l'homme, l'animal, les microorganismes et les plantes [94]. La *photobiologie* étudie les effets biologiques qui résultent de l'exposition au rayonnement optique.

Chez l'homme, les rayonnements optiques ont des effets visuels et non visuels. Les effets *visuels* concernent l'action spécifique de la lumière qui stimule les photorécepteurs rétiniens et donne naissance aux sensations visuelles. Les effets *non visuels* font référence à un ensemble de phénomènes physiologiques et pathologiques engendrés par les rayonnements optiques naturels ou artificiels. Ces effets non visuels peuvent être *bénéfiques* (synchronisation des rythmes biologiques, synthèse de la vitamine D...) ou *nocifs* (inflammation, lésion des tissus oculaires et cutanés, formation des tumeurs...). La nature et le caractère aigu ou chronique des effets nocifs des rayonnements optiques dépendent de la *longueur d'onde* et de l'*intensité* des radiations qui les composent ainsi que de la *durée d'exposition* au

rayonnement. Le caractère réversible ou irréversible, la gravité des effets du rayonnement optique dépendent à la fois de l'état fonctionnel de l'organisme et des réactions physiques, chimiques et physiologiques déclenchées par le rayonnement.

Le rayonnement optique agit à la fois directement (sur les tissus oculaires et cutanés), et indirectement sur les systèmes de régulation neuro-hormonaux. L'action *directe* du rayonnement optique peut être de nature mécanique (onde de choc), thermique ou photochimique ; elle dépend de la pénétration des radiations de différentes longueurs d'onde dans les tissus oculaire et cutané et de leur absorption par ces tissus. L'action *indirecte* du rayonnement optique (sur les rythmes biologiques, par exemple) dépend surtout de l'intégrité et l'état fonctionnel des systèmes de régulation neuro-hormonaux.

La connaissance des effets nocifs des rayonnements optiques est utile car elle permet d'élaborer des moyens de *protection* et de *prévention* des risques potentiels pour la santé présentés par l'exposition aux rayonnements UV et IR. Par ailleurs, la connaissance des effets bénéfiques des rayonnements optiques ont été exploités dans de nombreuses applications *thérapeutiques*. Ainsi, le rayonnement du spectre visible et surtout UV a été appliqué seul ou combiné à des médicaments sensibilisateurs pour traiter diverses maladies de la peau (*vitiligo lupus vulgaris, psoriasis*) ; la *photothérapie* a été utilisée dans le traitement de l'ictère néonatal, des dépressions saisonnières, etc. (tableau 14.1).

Longueurs d'onde Organe cible	UV (100-400 nm)	VISIBLES (380-780 nm)	IR-A 780-1400 nm)	IR-B,C (>1400 nm)
Effets traumatissants				
Peau	Erythème Vieillissement Photosensibilité médicamenteuse Carcinogénèse	Photosensibilité médicamenteuse	Brûlures	Brûlures
Oeil ♦ Cornée ♦ Cristallin ♦ Rétine	Kératoconjonctivite Cataracte (UV-A) Coloration, sclérose Altérations	Diminution de l'acuité visuelle Lésions photochimiques Rétinite solaire Dégénérescences maculaires	Lésions de choc Cataracte	Brûlures, choc Cataracte
Effets bénéfiques				
	Synthèse vitamine D Pigmentation de protection	Rythmes biologiques Activité hormonale Influence sur le comportement		Réchauffement
Photothérapie				
	Psoriasis Vitiligo Eczéma Herpes simplex Chirurgie dentaire Photochimiothérapie	Décollement de la rétine Rétinopathie diabétique Glaucome Chirurgie Dépression hivernale, travail posté, décalage horaire		

Tableau 14.1 : Effets photobiologiques des rayonnements UV, visibles et IR d'après [94]

2. Rayonnement optique

Le rayonnement optique comprend la gamme de longueurs d'onde du spectre électromagnétique correspondant aux rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge [5] :

- Le domaine UV du spectre, compris entre les longueurs d'onde de 100 à 380 nm est subdivisé, en UV-A (380-315 nm), UV-B (315 à 280 nm) et UV-C (280 à 100 nm).
- Le rayonnement visible est compris entre ≈380 et ≈760 nm.
- La partie IR du spectre, comprise entre les longueurs d'onde de 760 nm et 1 mm, est subdivisée en IR-A

(760-1400 nm), IR-B (1400-3000 nm), et IR-C (3000 nm-1 mm).

2.1. Sources de rayonnement optique

2.1.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire comprend environ 51 % de radiations visibles et 49 % de radiations invisibles, dont 6 % UV (A = 5,6 %, B = 0,4 %) et 43 % IR (A = 31 %, B = 12 %). Ces proportions varient selon la position géographique, l'altitude et le climat.

2.1.2. Sources artificielles

Les sources artificielles de rayonnement optique sont utilisées pour l'éclairage (voir fiche n° 11), les visualisations électroniques (écrans à tube cathodique, écrans matriciels, etc.) et comme source énergétique (le laser). En photothérapie et lumithérapie, les sources artificielles les plus fréquemment utilisées sont les émetteurs à fluorescence et les émetteurs aux halogénures métalliques. Ils émettent principalement du rayonnement UV (A et B, mixte (UV et visible) ou essentiellement du visible.

Observations

Les émetteurs à incandescence sont peu utilisés actuellement en photothérapie ; en revanche, la physiothérapie en fait usage pour le traitement local des douleurs rhumatismales, du lumbago, des névralgies ainsi qu'en rééducation musculaire [5].

3. Effets bénéfiques du rayonnement optique

Parmi les effets bénéfiques de l'exposition au rayonnement optique, les plus importants sont :

- la pigmentation cutanée de protection,
- la synthèse de la vitamine D par la peau,
- la synchronisation des rythmes biologiques,
- des effets photoimmunologiques et photothérapeutiques.

3.1. Synthèse de la vitamine D

La vitamine D est indispensable à l'absorption intestinale du calcium et du phosphore alimentaires et à la minéralisation des os. Elle peut être à la fois d'origine alimentaire et synthétisée au niveau de la peau par un processus photochimique. En effet, l'exposition de l'homme ou l'animal au rayonnement UV de 250 à 315 nm (avec un maximum d'efficacité vers 297 nm) engendre la synthèse cutanée de la vitamine D.

3.2. Synchronisation des rythmes biologiques circadiens

Le niveau d'activité du système nerveux central et végétatif, des systèmes de régulation métabolique et endocrinien ainsi que celui de nombreuses fonctions de l'organisme humain (cycle veille-sommeil, température corporelle, pression sanguine,

etc.) présentent des oscillations périodiques au cours du nyctémère. Ces oscillations quantitatives, régulières et prévisibles des processus physiologiques et biologiques ont un caractère héréditaire ; toutefois, leurs paramètres (période, phase, amplitude et niveau moyen) sont influencés par certaines variations rythmées de l'environnement (synchroniseurs) physique, comme l'alternance lumière/obscurité, et socio-écologique, comme la distribution temporelle des périodes de repos et de travail. Chez l'homme, la succession des périodes lumière-obscurité constitue le synchroniseur le plus puissant des rythmes circadiens¹.

L'information lumineuse traitée par la rétine est véhiculée par différentes voies nerveuses jusqu'à l'hypothalamus et à la glande pinéale². Celle-ci élabore la sérotonine et la mélatonine qui interviennent dans la régulation du sommeil. En effet, chez l'homme et l'animal, la sécrétion de mélatonine est maximale la nuit et minimale le jour. Lorsque les yeux sont exposés à la lumière pendant la nuit, la transformation de la sérotonine en mélatonine est inhibée et la production de mélatonine fortement réduite.

Outre la participation de la mélatonine et de la sérotonine dans le cycle veille-sommeil, la sérotonine constitue un neuromédiateur qui favorise la transmission neuronale au niveau cérébral. Certaines manifestations neuropsychiques (troubles d'humeur, dépression, fatigue mentale) sont attribuées à des déficits de production de la sérotonine.

Les perturbations des rythmes biologiques, surtout celui du cycle veille-sommeil dans le travail posté ou des vols transmériidiens, constituent un facteur important de stress car elles sollicitent en excès les mécanismes d'adaptation. En

¹ Les rythmes *circadiens* sont des rythmes biologiques qui ont une période d'environ 24 heures.

² Il s'agit probablement d'un circuit neurohormonal qui achemine les potentiels d'action neuronaux par la voie rétinohypothalamique vers les noyaux hypothalamiques (suprachiasmatique et paraventriculaire) reliés au thalamus, au tronc cérébral, à la moelle épinière et à l'épiphyse.

effet, la désynchronisation des rythmes biologiques par rapport à l'ancien horaire ainsi que leur resynchronisation par rapport au nouvel horaire, nécessitent des durées variables, pendant lesquelles les activités psycho-physiologiques et physiologiques sont plus ou moins altérées selon la tolérance individuelle aux changements de rythme. Ces altérations se traduisent par des symptômes de fatigue, troubles du sommeil, troubles digestifs et de l'humeur. Chez les travailleurs postés, la qualité du sommeil, la capacité de rester alerte pendant le travail et la performance sont réduites ; il en résulte un risque potentiel accru d'accident.

La stimulation lumineuse a été utilisée pour prévenir ou alléger les effets indésirables des désynchronisations des rythmes biologiques. Les résultats favorables obtenus en conditions expérimentales sont toutefois insuffisants pour recommander des niveaux d'éclairement élevés pendant un travail court ou prolongé [94].

3.3. *Photothérapie des troubles affectifs saisonniers*

Depuis une dizaine d'années, la littérature médicale fait état d'un syndrome dépressif qui apparaît chez un nombre relativement élevé de personnes (de 2 à 10 % de la population aux Etats-Unis) pendant l'hiver. Le syndrome, appelé par les Anglo-Saxons *Seasonal Affective Disorders (SAD)*, survient pendant les mois d'hiver et se manifeste par [5] :

- une diminution accentuée de l'énergie physique et de la résistance à l'effort,
- une dépression émotionnelle,
- une sensation de désespoir,
- une somnolence accrue et besoin de sommeil,
- une augmentation de l'appétit (surtout pour des hydrocarbonates),
- un évitement du contact social, etc.

Dans le traitement du SAD, il semble que l'exposition à la lumière ait des effets bénéfiques. Ainsi, la lumithérapie (lumière fluorescente de 2 500 à 10 000 lx, par exemple) appliquée pendant quelques secondes toutes les minutes pendant 2 heures permet d'obtenir des résultats favorables après 2 à 7 jours de traitement. Des réponses thérapeutiques évidentes ont été obtenues au moyens d'une exposition à

2 500 lx pendant 2 à 4 heures et de 25 000 lx pendant 30 minutes. Contrairement aux suppositions formulées au cours des premiers essais, il apparaît que le rayonnement UV n'est pas indispensable au traitement du syndrome SAD.

L'intensité lumineuse et la durée d'exposition doivent être adaptées aux particularités individuelles. Etant donné qu'il n'existe pas d'étude comparative des courbes dose-réponse pour différents types de lampes, il n'est pas possible d'établir de recommandations plus précises pour le traitement des troubles affectifs saisonniers en clinique, sur le lieu du travail ou à domicile.

4. Effets traumatisants du rayonnement optique

4.1. *Effets sur les tissus oculaires*

Les effets du rayonnement optique sur l'oeil dépendent de l'absorption spectrale des milieux intra-oculaires (fig.14.1) et de la sensibilité photochimique du tissu.

4.1.1. Rayonnement ultraviolet

Presque toutes les longueurs d'onde inférieures à 320 nm sont absorbées par la cornée ; celles comprises entre 320 et 400 nm sont absorbées par le cristallin. Cependant, la proportion du rayonnement absorbé dépend de l'âge (voir § 4.1.1.3.).

4.1.1.1. *Effets sur la cornée*

Le rayonnement UV peut provoquer une inflammation de la conjonctive (*photoconjunctivite*) et de la cornée (*photokératite*). En clinique, il s'agit d'un syndrome mixte - la kérato-conjunctivite - provoqué par l'exposition prolongée au rayonnement UV solaire, réfléchi par le sable ou par la neige (*ophtalmie des neiges*) ; la kérato-conjunctivite peut survenir de façon accidentelle, sous l'effet d'un rayonnement UV émis par des appareils germicides ou arcs à souder ("coup d'arc"), en l'absence de protection oculaire [5].

La symptomatologie comporte des sensations de corps étranger (de "sable") dans les yeux, gêne oculaire, photophobie, larmolement, rougeur du pourtour de la

paupière... La période de latence entre l'exposition et le début des effets varie entre 2 et 8 heures, selon la quantité de rayonnement reçue. Les effets des expositions modérées sont sans gravité mais ils peuvent alarmer le patient. Le rétablissement est rapide et complet en 48 heures. Le spectre d'action, similaire à celui qui produit l'érythème cutané, présente un maximum vers 270-280 nm ; il devient négligeable à 320 nm.

4.1.1.2. Effets sur le cristallin

Avec l'âge, le cristallin présente certaines modifications morpho-physiologiques : coloration jaune, augmentation du taux de protéines insolubles, sclérose avec perte d'accommodation et formation de plaques de *cataracte*. De nombreuses preuves épidémiologiques impliquent le rayonnement UV dans ces modifications. Ainsi, il existe une relation directe significative entre l'exposition aux UV-B (280-315 nm) et les opacités du cristallin chez les personnes qui vivent et travaillent dans des conditions de niveaux élevés d'énergie solaire ; la cataracte est très fréquente aux Indes, par exemple. Les UV (entre 245 et 310 nm) semblent contribuer à la formation de cataracte ; cependant, les effets des UVA solaires sont exceptionnels. Il convient toutefois de rappeler que la cataracte a une causalité plurifactorielle.

4.1.1.3. Effets sur la rétine

Il est difficile de préciser les effets du rayonnement UV sur la rétine parce qu'ils dépendent de la capacité de filtrage des structures prérétiniennes. En effet, chez l'adulte, le cristallin absorbe les longueurs d'onde inférieures à 400 nm et protège efficacement la rétine contre le rayonnement UV. Cependant, jusqu'à l'âge de 30 ans, un faible pourcentage de ces rayons peut atteindre la rétine. En revanche, l'ablation d'un cristallin atteint de cataracte rend la rétine plus vulnérable à l'action des UV inférieurs à 300 nm [1]. L'implantation chirurgicale d'un cristallin ainsi que certaines catégories de lentilles de contact peuvent rétablir la protection contre les UV.

4.1.2. Rayonnements visible et infrarouge

L'observation prolongée du soleil à l'oeil nu (regarder une éclipse, par exemple) provoque des lésions rétinienne avec perte de vision (*scotome*). L'incidence des lésions chorioretiniennes provoquées par l'exposition à la lumière artificielle dans le travail industriel est nettement plus faible que celle des lésions provoquées par le soleil. En effet, le réflexe de clignement ainsi que les mouvements oculaires qui détournent le regard de la source constituent des mécanismes naturels de protection. Toutefois, dans l'industrie moderne, il existe des risques pour la rétine lors de l'utilisation du laser et des diverses sources continues de rayonnement optique, telles que les lampes compactes à l'arc, les lampes tungsten-halogènes, les unités de soudure, les sources de rayonnement pulsé (*flash*), etc.

L'éclairement énergétique (*irradiance*)³ du rayonnement IR-A (780-1400 nm) peut atteindre 600 mW.cm⁻² dans les verreries et 1 000 mW.cm⁻² dans les aciéries [94]. En l'absence de mesures de protection, l'intensité de ces sources peut présenter des risques pour l'oeil [104]. Ainsi, des valeurs extrêmes d'éclairement énergétique ont été mises en relation avec les lésions de la cornée, du cristallin et de la rétine.

La chaleur provenant des expositions au rayonnement IR diffus de faible puissance est dispersée par les structures oculaires, mais lorsque la même quantité d'énergie est libérée sous forme d'impulsions sur de petites zones, elle peut provoquer des lésions. La lumière cohérente provenant des lasers⁴ peut traverser les structures oculaires et atteindre la rétine. Ces sources sont

³ L'éclairement énergétique (*irradiance*) est le quotient du flux énergétique reçu par un élément de la surface contenant le point, divisé par l'aire de cet élément. Unité : watt par mètre carré (W.m⁻²). Il est appelé débit de dose en photobiologie. La dose, correspondant à l'exposition énergétique est le produit de l'éclairement énergétique par la durée d'irradiation, exprimée en joules par mètre carré (J.m⁻²).

⁴ LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) signifie amplification de la lumière par émission stimulée du rayonnement.

souvent utilisées dans des buts thérapeutiques (photocoagulation, par exemple)

La lumière passe par la cornée, la chambre antérieure qui contient l'humeur aqueuse, le cristallin et le corps vitré pour atteindre la rétine. Celle-ci est vulnérable aux rayonnements de 400 à 1400 nm. Entre ces limites, la rétine est le tissu le plus sensible aux rayonnements. Au niveau de la rétine, la lumière traverse plusieurs couches avant de rencontrer les photorécepteurs. Juste derrière les cônes et les bâtonnets une couche de cellules pigmentées (épithélium pigmenté) absorbe une grande partie de la lumière qui traverse la rétine "nerveuse" laquelle est presque transparente à la lumière. L'épithélium pigmenté agit alors comme un rideau noir qui absorbe les photons qui n'ont pas été absorbés par le segment externe des cônes et des bâtonnets et empêche leur dispersion. L'épithélium pigmenté a une épaisseur de 10 μm tandis que la choroïde (couche vasculaire postérieure) a une épaisseur de 100 à 200 μm . La plupart de l'énergie lumineuse qui atteint la rétine est transformée en chaleur par l'épithélium pigmenté et la choroïde.

Les rayonnements de 400 à 1400 nm peuvent endommager la rétine par trois mécanismes différents : mécaniques et thermiques (visible et IR-A) et photochimiques (visible).

- Les lésions *mécaniques* (ondes de choc) sont provoquées par de hauts niveaux d'exposition pendant de très courtes durées : impulsions de pico et nanosecondes provenant des lasers à commutation rapide (*Q-switched lasers*);
- Les lésions *thermiques* sont provoquées par des impulsions qui durent entre 1 μs et 10 s lors des expositions accidentelles à des lampes à arc ou au rayonnement solaire. Indépendantes de la longueur d'onde des rayonnements, les lésions thermiques se produisent lorsque l'absorption du rayonnement par les tissus provoque une élévation de température de l'ordre de 10° à 20°. En clinique, ces lésions peuvent être dues à la photocoagulation ou au laser ;

- Les lésions *photochimiques* dépendent de la longueur d'onde du rayonnement. Ainsi, des rayonnements du spectre *visible* à courte longueur d'onde (bleu), de durée et d'intensité qui excluent des effets thermiques, peuvent provoquer des lésions des photorécepteurs [1] ("risque rétinien photochimique de la lumière bleue"). En effet, l'exposition chronique aux rayonnements compris entre 400 et 500 nm peut provoquer des lésions photochimiques [60].

Observations :

- Certains effets traumatisants du rayonnement optique sur l'oeil ont été observés surtout en conditions expérimentales ou accidentellement lorsque les victimes ne portaient pas de moyens de protection. Ainsi, des rats et souris exposés pendant des semaines voire des mois à la lumière fluorescente blanche froide, deviennent aveugles. Toutefois, chez les primates, des lésions similaires des photorécepteurs ont été observées uniquement lorsque les pupilles sont dilatées artificiellement et que l'exposition à 10 800 lux dure 12 heures. En effet, lorsque les pupilles ne sont pas dilatées, le même niveau d'éclairement, 12 h par jour durant 4 semaines ne provoque pas cet effet.
- Chez l'homme, le risque de lésions de la rétine dues à la lumière bleue diminue avec l'âge mais l'absence du cristallin (*aphakie*) après extirpation chirurgicale favorise les lésions dégénératives rétinienne [5].
- Toutes les radiations sont susceptibles de léser la rétine si elles sont suffisamment intenses. Néanmoins, le spectre visible est le principal responsable des lésions *rétiniennes* par rayonnement optique car les milieux antérieurs de l'oeil filtrent la plupart des rayonnements UV et IR. Cependant, en conditions normales, le rayonnement visible n'est pas nocif par lui-même [30] ; il peut l'être par les UV ou IR qui l'accompagnent souvent.

4.1.3. Rayonnement infrarouge B et C

Les rayonnements supérieurs à 1400 nm ne parviennent pas à la rétine mais peuvent provoquer des lésions au niveau de la cornée et du cristallin [6]. Ainsi, des observations cliniques ont signalé l'existence de cataractes provoquées par l'exposition prolongée au rayonnement IR. Il a été supposé que le rayonnement IR provoque une élévation de la température au niveau du cristallin qui, après quelques années, dénaturent les protéines du cristallin et partant, opacifient le cristallin. Cependant, les spécialistes considèrent que

le rayonnement IR est absorbé par l'iris pigmenté et transformé en chaleur qui, par conduction, parvient au cristallin ; il ne s'agirait donc pas d'une absorption directe du rayonnement IR par le cristallin [94].

La cataracte a été observée parmi les souffleurs de verre exposés au rayonnement IR mais les mesures de sécurité actuelles ont virtuellement éliminé ces effets chez les travailleurs.

4.2. Effets cutanés

4.2.1. Rayonnement ultraviolet

Les effets nuisibles du rayonnement UV sont l'érythème solaire, le cancer de la peau ainsi que les altérations morphologiques (rides, irrégularités, modifications de pigmentation, etc.) qui apparaissent comme signes de "vieillesse prématurée".

4.2.2. Rayonnement infrarouge

Le rayonnement infrarouge peut provoquer des érythèmes, voire des brûlures aiguës lors d'une exposition prolongée.

5. Photosensibilisation

Les effets oculaires et rétinien du rayonnement UV peuvent être augmentés ou diminués par la présence de composants photoactifs endogènes ou exogènes. Ainsi, le psoralène, les dérivés hématoportorphyriniques et d'autres agents photothérapeutiques peuvent intensifier l'effet nocif du rayonnement sur l'oeil et les tissus. En revanche, la vitamine E diminuerait le risque de nocivité du rayonnement [94].

6. Prévention

Le Bureau National de Protection Radiologique (NRPB) considère que les

sources lumineuses domestiques et au travail ne sont pas normalement dangereuses. Toutefois, dans certaines circonstances, il existe un risque significatif d'accident dû aux rayonnements émis par les lampes tungstène-halogènes [cf. 103; 105] et les lampes à vapeur de mercure.

Les lampes tungstène-halogènes sont utilisées pour la projection, les studios de télévision et le théâtre. Ces lampes opèrent à haute température, elles peuvent donc émettre une quantité significative de rayonnement UV qui peut être nocive si l'exposition est de longue durée et si la distance entre la lampe et l'utilisateur est courte (1 à 2 m). De telles lampes sont utilisées à la maison. En conditions normales, il n'existe pas d'effet nocif, sauf si l'exposition se prolonge et les filtres protecteurs sont déplacés accidentellement ou délibérément [77].

Les lampes à vapeur de mercure avec décharge à haute pression sont utilisées pour l'éclairage général industriel et commercial, pour les rues et les projecteurs. D'habitude, elles ont un tube interne de décharge et une ampoule extérieure en verre. L'ampoule externe absorbe la plupart du rayonnement UV résiduel qui n'a pas été absorbé par le tube interne, mais s'il se casse, des niveaux élevés, nocifs, de rayonnement UV peuvent être émis. Il ne faut donc pas utiliser les lampes endommagées. Les versions fluorescentes de ce type de lampe présentent le même risque. La lumière fluorescente augmenterait les risques de mélanomes de la peau. Toutefois, cette hypothèse n'a pas été confirmée car la corrélation entre l'exposition aux UV et l'incidence des mélanomes cutanés est faible.

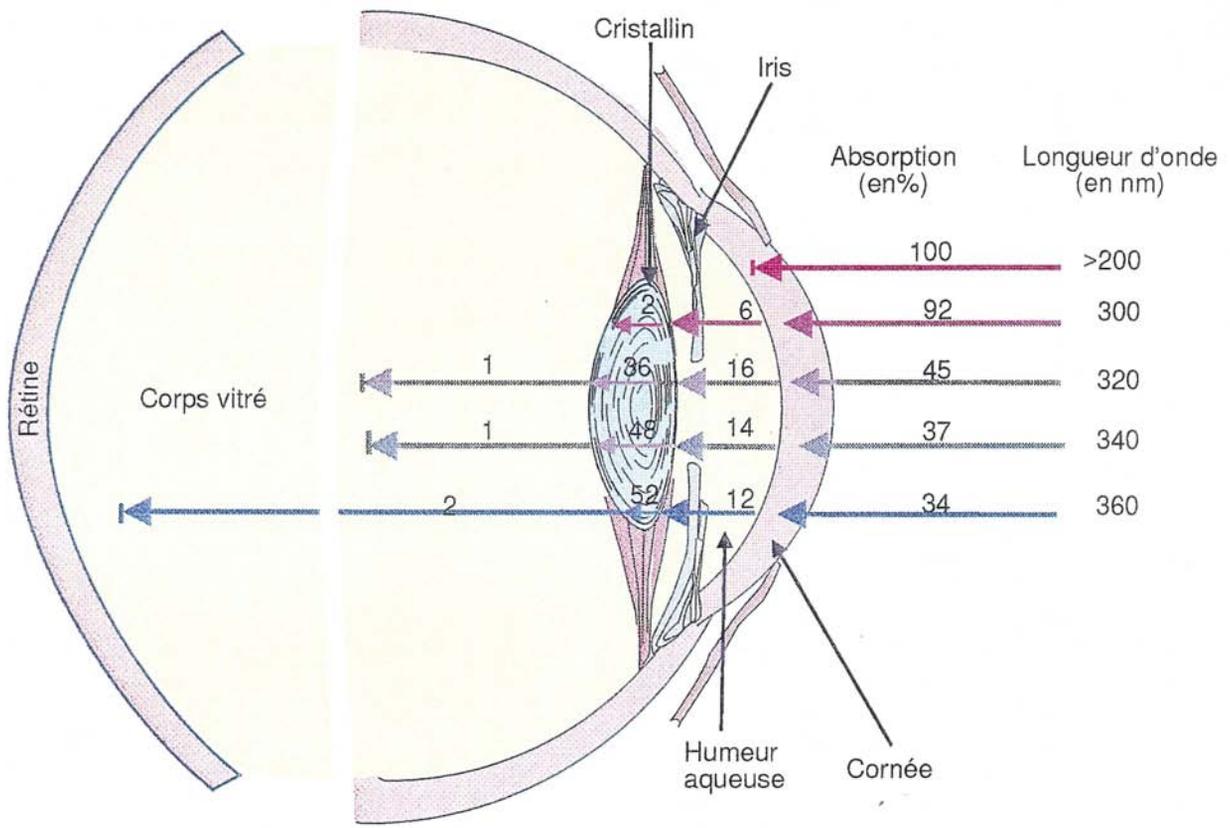


Figure 14.1. Absorption du rayonnement ultraviolet par les différents milieux oculaires

B I B L I O G R A P H I E

- [1] AMALRIC P., MUR J., SANTUCCI, G. - Oeil et lumière. Bulletin des Sociétés d'Ophtalmologie de France, Rapport annuel, Numéro spécial, Novembre, 1990.
- [2] AMERICAN NATIONAL STANDARD PRACTICE OF OFFICE LIGHTING. - Office Lighting. I.E.S., 1993.
- [3] AOKI K., YAMANOI N., AOKI M., HORIE Y. - A study on the change of visual function in CRT display task. In : Salvendy G. (ed). Human-Computer Interaction. Amsterdam, Elsevier, 1984, 465-468.
- [4] ASSOCIATION FRANCAISE DE L'ECLAIRAGE (A.F.E.). - Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail. Société d'éditions Lux, 1993.
- [5] ASSOCIATION FRANCAISE DE L'ECLAIRAGE (A.F.E.). - Les radiations optiques en médecine. Société d'éditions Lux, 1993.
- [6] BARLIER A., SALSIS S. - Rayonnement infrarouge et cataracte. I.N.R.S., Cahiers de Notes Documentaires, 1995, 161, 469-475.
- [7] BARTHES E. - L'évolution de l'éclairagisme par la métrologie en éclairage intérieur. Lux, 1983, 123, 14-18.
- [8] BARTLEY S.H., CHUTE E.F. - Fatigue and impairment in man. New York, McGraw Hill, 1947.
- [9] BERGMAN T. - Health effects of video display terminals. Occupational Health and Safety, 1980, 25-28, 53-55.
- [10] BERGQVIST U. - Video display terminals and health. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, 1984, 10, suppl. 2, 1-87.
- [11] BERGQVIST U., KNAVE B. - Eye discomforts and work with visual display terminals. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, 1994, 20, 27-33.
- [12] BERGQVIST U., KNAVE B., WIBOM R. - Eye discomforts during work with visual display terminals. In : Grieco A., Molteni G., Piccoli B., Occipinti, E. (eds). Work With Display Units 94, Amsterdam, Elsevier, 1995, 83-88.
- [13] BLACKWELL O.M., BLACKWELL H.R. - Visual performance data for 156 normal observers of various ages. Journal of Illuminating Engineering Society, 1971, 1, 3-18.
- [14] BLACKWELL O.M., BLACKWELL H.R. - Individual responses to lighting parameters for a population of 235 observers of varying ages. Journal of Illuminating Engineering Society, 1980, 9, 205-232.
- [15] BLACKWELL H.R., SCOTT D.R. Analysis of visual performance data obtained in a Landolt ring task without response limitation. Journal of Illuminating Engineering Society, 1973, II, 445-460.
- [16] BOER J.B., FISCHER D. - Interior lighting. Deventer, Kluwer Techniche Boeken, 1981.
- [17] BROADBENT D.E. - The Society' lecture : Is a fatigue test now possible ? Ergonomics, 1979, 22, 1277-1290.
- [18] BUGARD P. - Fatigue et asthénie. Psychologie Médicale, 1978, 10, 1889-1992.
- [19] CAIL F. - Méthodes de terrain pour l'investigation de la fatigue visuelle. INRS, Documents pour le Médecin du Travail, 1992, 50, 159-166.
- [20] CAIL F., FLORU R. - Organisation temporelle du travail sur écran. INRS, Cahiers de Notes Documentaires, 1993, 153, 551-556.
- [21] CAIL F., SALSIS S. - La fatigue visuelle. Les Notes Scientifiques et Techniques de l'INRS 1992, 92.
- [22] ÇAKIR A., HART, O.J., STEWART T.F.M. - Les terminaux à écran. Paris, Les Editions d'Organisation, 1980.
- [23] CAMERON C. - A theory of fatigue. Ergonomics, 1973, 16, 633-648.
- [24] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. - Guide on interior lighting. Vienna, Publication CIE N° 29.2, 1986.
- [25] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE - Vocabulaire de l'éclairage. Paris, Publication CIE N° 17.4, 1987.
- [26] CORNELIO G., DA POZZO S., FERRI R., PERISSUTTI P., PETRONIO L. - Subjective symptoms and ophthalmologic findings in VDU employees. In : Luczak H., Çakir A., Çakir G. (eds). Work with Display Units 92. Amsterdam, Elsevier, 1993, 268-272.
- [27] CUSHMAN W.H. - Reading from microfiche, a VDT, and the printed page : subjective fatigue and performance. Human Factors, 1986, 28, 63-73.

- [28] DAINOFF M.J., HAPP A., CRANE, P. - Visual fatigue and occupational stress in VDT operators. *Human Factors*, 1981, 23, 421-438.
- [29] DAVIES D.R., PARASURAMAN R. - The psychology of vigilance. London, Academic Press, 1982.
- [30] DUFOUR V., MONTARD M. - Les effets nocifs des ultraviolets sur l'oeil dans le monde du travail. I.N.R.S. Documents pour le Médecin du Travail, 1995, 63, 187-191.
- [31] DUBOIS-POULSEN A., BESSOU P. - La fatigue visuelle. In : *Vision-travail. Colloque international, Rodez-Toulouse, 23 - 25 novembre 1978. Rodez-Toulouse, IRACT, 1978, 109-110.*
- [32] DUKE-ELDER S., ABRAMS D. - Ophthalmic optic and refraction. In : Duke-Elder S. (ed) - *System of ophthalmology, vol V, St. Louis, C V Mosby, 1970.*
- [33] ECLAIRAGE DES LIEUX DE TRAVAIL (Synthèse établie par C. Soudry) - INRS, Documents pour le Médecin de Travail, 1995, 63, 199-210.
- [34] EHRLICH D.L. - Near vision stress : vergence adaptation and accommodative fatigue. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 1987, 7, 353-357.
- [35] ELIAS R., CAIL F. - Exigences visuelles et fatigue dans deux types de tâches informatisées. *Le Travail Humain*, 1983, 46, 81-92.
- [36] ELIAS R., CAIL F. Travail sous binoculaires : astreintes visuelles et posturales. *Cahiers de Notes Documentaires*, 1984, 117, 451-456.
- [37] FLORIS A. - Evolution des sources lumineuses. *Qualita*, 1996, 45, EDF.
- [38] FLORU R., CAIL F., ELIAS R. - Psychophysiological changes during a VDU repetitive task. *Ergonomics*, 1985, 28, 1455-1468.
- [39] FLORU R., CAIL F. - Psychophysiological investigations on VDU repetitive task. In : Brown I.D., Goldsmith R., Coombes K., Sinclair M.A. (eds). *Ergonomics international 85. London, Taylor & Francis, 1985, 694-696.*
- [40] FLORU R., CAIL F. Data entry task on VDU : underload or overload. - In : Knave B., Widebäck, P.-G. (eds). *Work with display units 86. Amsterdam, Elsevier, 1987, 756-767.*
- [41] FLORU R., CNOCKAERT J.C. - Introduction à la psychophysiologie du travail. Presses Universitaires de Nancy, 1991.
- [42] FORTUIN G.J. - Lighting : Physiological and psychological aspects - Optimum use - Specific industrial problems. In : *Ergonomics and physical environmental factors. Genève, International Labour Office, 1970, 237-259.*
- [43] GINSBURG A.P., CANNON M.W., EVANS D.W., OWSLEY C., MULVANEY P. - Large sample norms for contrast sensitivity. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 1984, 61, 80-84.
- [44] GOBBA F.M., BROGLIA A., SARTI R., LUBERTO F., CAVALLIERI A. - Visual fatigue in video display terminal operators : objective measure and relation to environmental conditions. *International Archives of Occupational Environment and Health*, 1988, 60, 81-87.
- [45] GOULD J.D., GRISCHKOWSKY N. - Doing the same work with hard copy and with cathode-ray tube (CRT) computer terminal. *Human Factors* 1984, 26, 323-337.
- [46] GRANDJEAN E. - Précis d'ergonomie. Paris, Les éditions d'organisation, 1983.
- [47] GRANDJEAN E. - Ergonomics in Computerized Offices. London, Taylor and Francis, 1987.
- [48] GRATTON I., PICCOLI B., ZANIBONI A., MERONI M., GRIECO A. - Change in visual function and viewing distance during work with VDTs. *Ergonomics*, 1990, 33, 1433-1441.
- [49] GREENHOUSE D.S, BAILEY I.L, HORWATH A.- Spatial adaptation to video text displays. In : *Le travail à l'écran de visualisation. Deuxième conférence scientifique internationale, Montréal, 11-14 septembre 1989. Montréal, IRSST, 1989, 67.*
- [50] GREMY F. - Les tâches visuelles. Hygiène de la vision. In : Gremy F., Perrin J. (eds). *Eléments de biophysique, Chap. 33, Paris, Flammarion, 1971.*
- [51] GRIGNOLO F.M., BROVARONE F.V., ANFOSSI D.G., VALLI G. - Considerations on ocular motility and refractive errors in VDU operators. In : Grandjean E. (ed). *Ergonomics and Health in Modern Offices. London, Taylor and Francis, 1984, 431-435.*
- [52] HAIDER M., KUNDI M., WEIBENBÖCK M. - Worker strain related to VDUs with differently coloured characters. In : Grandjean E., Vigliani E. (eds). *Ergonomic Aspects of Visual Display Terminal. London, Taylor and Francis, 1980, 53-64.*
- [53] HARPSTER J.L., FREIVALDS A., SHULMAN G.L., LEIBOWITZ H.W. - Visual performance on CRT screens and hard-copy displays. *Human Factors*, 1989, 31, 247-257.

- [54] HEDMAN L., BRIEM, V. - Focusing accuracy of VDT operators as a function of age and task. In : Grandjean E. (ed). *Ergonomics and Health in Modern Offices*. London, Taylor and Francis, 1984, 280-284.
- [55] HEDMAN, L.R., BRIEM, V. - Focusing variability during visual work. In : Knave B., Widebäck, P.-G. (eds). *Work with display units 86*. Amsterdam, Elsevier, 1987, 739-744.
- [56] HOLDING D. - Fatigue. In : Hockey, R. (ed). *Stress and fatigue in human performance*. New York, J. Wiley, 1983, 145-168.
- [57] HUGHES P.C., NEER R.M. - Lighting for the elderly : a psychobiological approach to lighting. *Human Factors*, 1981, 23, 65-85.
- [58] INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE (INRS) - Les écrans de visualisation : guide méthodologique pour le médecin du travail, 1993, Paris, INRS, ED n° 666.
- [59] INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE (INRS) - La couleur dans les locaux de travail, *Travail et Sécurité*, 1992, 11, 619-622.
- [60] INTERNATIONAL LABOUR OFFICE. - Occupational hazards from non-ionizing electromagnetic radiation. *Occupational safety and health hazard series*, 1985, 53, Genève.
- [61] JASCHINSKI-KRUZA W. - Transient myopia after visual work. *Ergonomics*, 1984, 27, 1181-1189.
- [62] JASCHINSKI-KRUZA W. - Is the resting state of our eyes a favorable viewing distance for VDU-work ? In : Knave B., Widebäck P.-G. (eds). - *Work with Display Units 86*. Amsterdam, Elsevier, 1987, 526-538.
- [63] JASCHINSKI-KRUZA W. - Visual strain during VDU work : the effect of viewing distance and dark focus. *Ergonomics*, 1988, 31, 1449-1465.
- [64] JEANNEROD M. - Les deux mécanismes de la vision. Paris, Editions du Seuil - La Recherche, 1977.
- [65] KAHNEMAN D. *Attention and effort*. - Engelwood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1973.
- [66] KALSBECK J.W.H., Umbach F.W. - Tasks involving contrast resolution, spatial and temporal resolution presented on VDU screen as a measuring technique of visual fatigue. In : Grandjean E., Vigliani E. (eds). *Ergonomic aspects of visual display terminals*. London, Taylor & Francis, 1980, 71-76.
- [67] KARN K.S., MERSHON D.H. - Dark focus, dark vergence and subjective reports of visual fatigue during CRT display viewing. In : Alluisi M.J., De Groot S., Alluisi E.A. - *Proceedings of the Human Factors Society. 28th annual meeting, San Antonio, 22-26 octobre 1984*. Santa Monica, Human Factors Society, 1984, 935-936.
- [68] KNAVE B.G. - Ergonomics and lighting. *Applied Ergonomics*, 1984, 15, 15-20.
- [69] KNAVE, B.G., WIBOM, R.I., VOSS, M., HEDSTROM, L.D., BERGQVIST U.O.V. - Work with video display terminals among office employees. I. Subjective symptoms and discomfort. *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 1985, 11, 457-466.
- [70] KOBRICK J.L., ZELTZER H.I., MULLEN S.P. - A system for controlled presentation of the Arden contrast sensitivity test. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1988, 667-669.
- [71] KORETZ J., HANDELMAN G. - L'oeil : son accommodation et son vieillissement. *Pour la Science*, 1988, 131, 22-29.
- [72] KRUEGER H., CONRADY P., ZÜLCH J. - Work with magnifying glasses. *Ergonomics*, 1989, 32, 785-794.
- [73] KURIMOTO S., IWASAKI T., NORO K., YAMAMOTO S., KOMATSUBARA A. - Eye strain in VDT work from the standpoint of ergophthalmology. In : Noro (ed). - *Occupational Health and Safety in Automation and Robotics*. London, Taylor and Francis, 1987, 110-136.
- [74] LÄUBLI TH., HUNTING W., GRANDJEAN E. - Postural and visual loads at VDT workplaces, II. lighting conditions and visual impairments. *Ergonomics*, 1981, 24, 933-944.
- [75] LAVILLE A., TEIGER C., LANTIN G., DESSORS D. - Quelques caractéristiques de la fatigue visuelle provoquées par le travail de détection sur microfiches. *Le Travail Humain*, 1979, 42, 261-273.
- [76] LEVY, F., RAMBERG, I.G. - Eye fatigue among VDU users and non VDU users. In : Knave B., Widebäck P.-G. (eds). *Work with display units 86*. Amsterdam. Elsevier, 1987, 42-52.
- [77] LIGHTING AT WORK. - Health & Safety Executive, London, Crown, 1987.
- [78] LUNN R., BANKS W.P. - Visual fatigue and spatial frequency adaptation to video displays of text. *Human Factors*, 1986, 28, 457-464.

- [79] MEYER J.J. - L'évaluation de la charge visuelle et des risques pour la vue lors de l'utilisation intensive d'un microscope binoculaire. Les travaux à forte exigence visuelle : le cas du travail sous microscope et sous loupe binoculaire. Toulouse, Journées d'études de l'ANACT, 1980.
- [80] MEYER J.J., BOUSQUET A., ZOGANAS L., SCHIRA J.Cl. - Discomfort and disability glare in VDT operators. In : Berlinguet L., Berthelette D. (eds). *Work With Display Units 89*, Amsterdam, Elsevier, 1990, 29-37.
- [81] MEYER J.J., GRAMONI R., KOROL S., REY P. - Quelques aspects de la charge visuelle aux postes de travail impliquant un écran de visualisation. *Le Travail Humain*, 1979, 42, 2, 275-301.
- [82] MEYER J.J., REY P., KOROL S., GRAMONI R. - La fatigue oculaire engendrée par le travail sur écran de visualisation. *Médecine sociale et préventive*, 1978, 23, 295-296.
- [83] MIKEALIAN H.H. - Changes in contrast sensitivity function produced by VDT use. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1988, 28, 637-642.
- [84] MOURANT R.R., LAKSHMANAN R., CHANTADISAL R. - Visual fatigue and cathode ray tube display terminals. *Human Factors*, 1981, 23, 529-540.
- [85] NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). *Video display, work and vision*. Washington, National Academy Press, 1983.
- [86] NYMAN K.G. - An experimental study on visual strain and microscopy work. *Acta Ophthalmologica*, 1984, suppl. 161, 94.
- [87] NYMAN K.G., KNAVE B.G., VOSS M. - Work with video display terminals among office employees ; IV. Refraction, accommodation, convergence and binocular vision. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 1985, 11, 483-487.
- [88] ÖSTBERG O. - Accommodation and visual fatigue in display work. In : Grandjean E., Vigliani E. (eds). *Ergonomic aspects of visual display terminals*. London : Taylor and Francis, 1980, 41-52.
- [89] ÖSTBERG, O., SMITH, M.J. - Effects on visual accommodation and subjective visual discomfort from VDT work intensified through split screen technique". In Knave B., Widebäck P.-G. (eds).. *Work with display units 86*, Amsterdam, Elsevier, 1987, 512-521.
- [90] OWENS D.A., WOLF-KELLY K. - Near work, visual fatigue, and variations of oculomotor tonus. *Investigate Ophthalmology and Visual Science*, 1987, 28, 743-749.
- [91] PELLET F., RUL-HERVE C., BERTHEMY-PELLET S., DE GAUDEMARIS R., MOUILLON M., MALLION J.M. - Variation des punctum proximum d'accommodation et de convergence en fonction de la charge visuelle. *Archives des Maladies Professionnelles*, 1989, 50, 541-546.
- [92] PHEASANT S. - *Ergonomics, work and health*. London, Macmillan, 1991.
- [93] PIRENNE M. H. - *L'oeil et la vision*. Paris, Gauthier-Villars, 1972.
- [94] REA S.M. (ed). - *Lighting Handbook 8th edition*. New York, Illuminating Engineering Society of North America, 1993.
- [95] REY P., BOUSQUET A. - Visual strain of VDT operators : the right and the wrong. In : Smith M.J., Salvendy G. (eds). - *Work with Computers : Organizational, Management, Stress and Health Aspects*. Amsterdam, Elsevier, 1989, 308-315.
- [96] REY P., MEYER J.J. - Visual impairments and their objective correlates. In : Grandjean E., Vigliani E. (eds). - *Ergonomics Aspects of Visual Display Terminals*. London, Taylor and Francis, 1980, 77-83.
- [97] REY P., MEYER J. J. - Vision et Eclairage. In : Scherrer J., Monod H. (eds) - *Précis de Physiologie du Travail. Notions d'ergonomie*. Paris, Mason, 1981, 429-472.
- [98] ROSENZWEIG M.R., LEIMAN A.L - *Psychophysiologie* - Paris, Interédition, 1991.
- [99] RUBINO G.F. - Epidemiologic survey of ocular disorders. The italian multicentric research. In : Berlinguet L., Berthelette D. (eds). *Work with display units 89*. Amsterdam, Elsevier, 1990, 13-20.
- [100] RUBINO G.F., MAINA G., SONNINO A., GRIGNOLO F.M., PESCE F., DI BARI A., MORUZZI F. Visual impairment and subjective ocular symptomatology in VDT operators. In : Knave B., Widebäck P.-G. (eds). *Work with display units 1986*. Amsterdam, Elsevier, 1987, 504-511.
- [101] SAITO M. - The effect of forced visual work on the visual nervous system. In : Salvendy G. (ed)- *Human-Computer Interaction*. Amsterdam, Elsevier, 1984, 303-306.
- [102] SAITO M., TANAKA T. - Eyestrain in inspection and clerical workers. *Ergonomics*, 1981, 24, 161-173.
- [103] SALSI S., BARLIER A. - Lampes tungsten halogène. Risques et limites d'utilisation. I.N.R.S. *Cahiers de Notes Documentaires*, 1992, 148, 329-343.

- [104] SALSU S., BARLIER A. - Rayonnements optiques dans les verreries à main. I.N.R.S. Cahiers de Notes Documentaires, 1989, 137, 639-654.
- [105] SALSU S., BARLIER A. - Dangers présentés par les lampes halogène. I.N.R.S., Travail et Sécurité, 1993, 1-27.
- [106] SALSU S., CAIL F., BARLIER A., MOUZE-AMADY M. - Variations du seuil de contraste au cours d'un travail de longue durée sur écran de visualisation, Cahiers de Notes Documentaires, 1997 (sous presse).
- [107] SAUTER, S. - Predictors of strain in VDT users and traditional office workers. In : Grandjean, E. (ed). Ergonomics and health in modern offices. London, Taylor and Francis, 1984, 129-135.
- [108] SAUTER, S., DAINOFF, M., SMITH, M. - Promoting health and productivity in the computerized office. London, Taylor and Francis, 1990.
- [109] SCHERRER J., MONOD H. - Point de vue physiologique sur la fatigue. In : La fatigue, Travaux du IIIème Congrès International de Médecine Psychosomatique publié sur la direction de Chertok L. et Sapir M. Toulouse, Ed. Edouard Privat, 1967, 17-22.
- [110] SCHLEIFER L.M., SAUTER S.L., SMITH R.J., KNUTSON S. - Ergonomic predictors of visual system complaints in VDT data entry work. Behaviour and Information Technology, 1990, 9, 273-282.
- [111] SHANAVAZ H., HEDMAN L. - Visual accommodation changes in VDU operators related to environmental lighting and screen quality. Ergonomics, 1984, 27, 1071-1082.
- [112] SHEEDY J.E. - How to eliminate vision symptoms - treat the eyes and fix the environment : a report from the VDT eye clinic. In : Luczak H., Çakir A., Çakir, G. (eds). Work with Display Units 92. Amsterdam, Elsevier, 1993, 258-262.
- [113] SHIKAWA S. - Examination of the near triad in VDU operators. Ergonomics, 1990, 33, 787-798.
- [114] SJÖGREN S., ELFSTRÖM A. - Eye discomfort among 4000 VDU users. In : Berlinguet L. Berthelette D. (eds). Work with display units 89. Amsterdam, Elsevier, 1990, 21-27.
- [115] SMITH A.B., TANAKA S., HALPERIN W. - Correlates of ocular and somatic symptoms among video display terminal users. Human Factors, 1984, 26, 143-156.
- [116] SMITH W. J. - A review of literature relating to visual fatigue. In : Bensel CK, (ed). Proceedings of the Human Factors Society : 23rd annual meeting 1979. Santa Monica, Human Factors Society 1979, 362-366.
- [117] SÖDERBERG I., CALISSENDORFF B., ELOFSSON S., KNAVE B., NYMAN K.G. - Investigation of visual strain experienced by microscope operators at an electronic plant. Applied Ergonomics, 1983, 14, 297-305.
- [118] STAMMERJOHN L.W., SMITH M.J., COHEN B.G.F. - Evaluation of work station design factors in VDT operations. Human Factors, 1981, 23, 401-412.
- [119] STEWART T.F.M. - Eyestrain and and visual display units : a review. Displays, 1979.
- [120] STEWART T.F.M. - Ergonomics of the office. Ergonomics, 1985, 28, 1165-1177.
- [121] VERRIEST G. - Le champ visuel fonctionnel. CAMP, 1982, 5-20.
- [122] VERRIEST G., HERMANS G. - Vue et profession. Bruxelles, Imprimerie Médicale et Scientifique, 1976.
- [123] VOLLE M.A., BRISSON G.R., DION M. - Fréquence de fusion critique visuelle et mesure de fatigue : état de la question. Le Travail Humain, 1980, 43, 65-86.
- [124] WATTEN R. G., LIE I., MAGNUSSEN S. - VDU work, contrast adaptation, and visual fatigue. Behaviour and Information Technology, 1992, 11, 262-267.
- [125] WESTON H.C. - Light, sight and efficiency. London, Lewis and Co, 1949.
- [126] WESTON H.C. - Visual fatigue, with special reference to lighting. In : Floyd W.F, Welford A.T. (eds). Symposium on fatigue. London, Lewis & Co. Ltd, 1953, 117-135.
- [127] WORLD HEALTH ORGANISATION (WHO) - Visual display terminals and workers' health. Genève, 1987.
- [128] WILKINS A.J., NIMMO-SMITH M.I. - The clarity and comfort of printed text. Ergonomics, 1987, 30, 1705-1720.
- [129] WOO G.C., STRONG G., IRVING E., ING B. - Are there subtle changes in vision after use of VDT ? In : Knave B., Widebäck P.-G. (eds).. Work with display units 1986. Amsterdam, Elsevier, 1987, 490-503.
- [130] YAMAMOTO S., NORO K. - The effect of variation of saccadic eye movement on VDU operation. In : Grandjean E. (ed). - Ergonomics and Health in Modern Offices. London, Taylor and Francis, 1984, 305-309.
- [131] YAMAZAKI T., KAMIJO K. - Visual evoked potentials as an indicator of visual fatigue. In : Smith M.J., Salvendy G. (eds). Work with computers : organizational, management, stress and health aspects. Amsterdam, Elsevier, 1989, 676-679.

LEXIQUE ¹

ABAT-JOUR - Ecran en matière opaque ou diffusante, destiné à masquer la lampe à la vue directe.

ACUITE VISUELLE - Capacité de distinguer les détails fins des objets ou d'images. La mesure d'acuité visuelle indique la taille minimale d'un objet en minutes d'arc (seuil de taille).

ADAPTATION - Modification de la sensibilité du système visuel aux variations d'intensité de la lumière.

AMBIANCE LUMINEUSE (*luminous environment*) - Ambiance physiologique et psychologique créée dans un local par la lumière (niveau et répartition de l'éclairage, mode et chromaticité de l'éclairage) et par la couleur (teinte, saturation, répartition dans l'espace, rendu des couleurs) en relation avec la forme du local.

BRILLANCE - Intensité subjective de la sensation lumineuse provenant d'une surface ; dépend de la luminance de l'objet et de l'état d'adaptation de l'oeil.

CHAMP VISUEL - Partie de l'espace qui peut être vue par une personne qui ne bouge pas la tête.

CONTRASTE DE LUMINANCE - Relation entre la luminance d'un objet et le fond sur lequel il se détache.

EBLOUISSEMENT (*glare*) - Sensations de gêne ou troubles de la vision (réduction de visibilité ou de performance visuelle) provoqués par des luminances excessives ou par des luminances non uniformément réparties dans le champ visuel.

EBLOUISSEMENT DIRECT - Eblouissement provoqué par une source lumineuse située dans la même direction que l'objet regardé. Il est présent lorsqu'il existe des zones brillantes telles que les luminaires, les plafonniers et les fenêtres proches de la tâche visuelle ou la région examinée.

EBLOUISSEMENT INDIRECT - Eblouissement provoqué par une source lumineuse dont la direction ne coïncide pas avec l'objet examiné.

EBLOUISSEMENT INCONFORTABLE (*discomfort glare*) - Eblouissement produisant une sensation désagréable sans nécessairement troubler la vue.

EBLOUISSEMENT PERTURBATEUR (*disability glare*) - Eblouissement qui diminue la visibilité et la performance visuelle sans nécessairement provoquer une sensation désagréable.

ECLAIRAGE (*lighting*) - Application de la lumière aux objets ou à leur entourage pour qu'ils puissent être vus.

ECLAIRAGE D'AMBIANCE - Eclairage qui produit l'éclairage général d'un environnement.

ECLAIRAGE D'URGENCE (*emergency lighting*) - Eclairage destiné à être utilisé lorsque l'installation principale tombe en panne.

ECLAIRAGE DIFFUS (*diffused lighting*) - Eclairage fourni à un plan de travail ou à un objet, qui ne provient pas d'une direction privilégiée.

ECLAIRAGE DIRIGE (*directional lighting*) - Eclairage provenant d'une direction privilégiée pour éclairer un plan de travail, une tâche ou un objet.

ECLAIRAGE GENERAL - Eclairage conçu pour éclairer de façon uniforme la totalité d'un espace, sans tenir compte de nécessités particulières dans certains points déterminés.

ECLAIRAGE INDIRECT - Eclairage où la plupart de la lumière éclaire une surface (d'habitude le plan de travail) après avoir été réfléchi par une autre surface.

ECLAIRAGE LOCAL - Eclairage conçu pour éclairer une petite zone qui ne dépasse pas la tâche.

ECLAIRAGE LOCALISE - Eclairage conçu pour éclairer un intérieur et en même temps fournir des niveaux d'éclairage sur certaines zones ou parties de l'intérieur.

ECLAIRAGISME (*lighting technology*) - Ensemble des techniques d'éclairage et de ses fondements scientifiques.

ECLAIREMENT (*illumination, illuminance*) - Niveau d'éclairage. Flux lumineux incident par unité de surface. Unité : lux = lumen.m⁻².

ECLAIREMENT LUMINEUX (*illuminance*) [$E = d\phi/dA$] - Densité du flux lumineux incident sur une surface ; quotient du flux lumineux reçu par un élément de la surface, par l'aire de cet élément. Unité = lux.

ECLAIREMENT ENERGETIQUE (*irradiance*) - Quotient du flux énergétique reçu par un élément de la surface contenant le point, divisé par l'aire de cet élément. Unité : watt par mètre carré (W.m⁻²) Il est dénommé débit de dose en photobiologie.

¹ voir [25 ; 4 ; 94]

EFFICACITE LUMINEUSE (d'une source) - Rapport entre le flux lumineux émis et la puissance consommée (par une lampe). Unité : Lumen par watt ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$).

EFFICACITE LUMINEUSE RELATIVE SPECTRALE (d'un rayonnement monochromatique de longueur d'onde λ) (*spectral luminous efficiency*) - Rapport du flux énergétique de longueur d'onde λ_m au flux de longueur d'onde λ , les deux rayonnements produisant des sensations lumineuses également intenses dans des conditions photométriques spécifiées et λ_m étant choisi de façon que la valeur maximale de ce rapport soit égale à 1. Symboles : $V(\lambda)$ - pour la vision photopique et $V'(\lambda)$ - pour la vision scotopique.

ENERGIE RAYONNANTE - Energie émise, transportée ou reçue sous forme de rayonnement. Unité : joule (J).

EVALUATION DE L'EBLOUISSEMENT INCONFORTABLE (*Discomfort Glare Rating - DGR*) - Evaluation numérique de la capacité d'un nombre de sources de luminance (luminaires, par exemple) dans un environnement visuel donné, à produire l'inconfort.

FACTEUR D'ABSORPTION (*absorptance*) - Rapport du flux énergétique ou lumineux absorbé au flux incident.

FACTEUR D'EBLOUISSEMENT PERTURBATEUR (*Disability Glare Factor - DGF*) - Mesure de visibilité d'une tâche dans une installation donnée comparée à sa visibilité dans des conditions de référence ; s'exprime par le rapport des contrastes de luminance ayant un effet équivalent sur la visibilité de la tâche.

FACTEUR DE LUMINANCE (β) - Rapport entre la luminance d'une surface dans des conditions spécifiées d'incidence, d'observation et de source de lumière à la luminance d'une surface qui diffuse parfaitement et reflète complètement la lumière dans les mêmes conditions.

FACTEUR DE REFLEXION (*reflectance*) - Rapport entre le flux lumineux réfléchi et incident.

FACTEUR DE RENDU DU CONTRASTE (*Contrast Rendering Factor - CRF*) - Rapport entre le contraste d'une tâche visuelle dans un environnement lumineux donné et le contraste dans un environnement de référence (sphère à luminance uniforme).

FACTEUR DE TRANSMISSION (*transmittance*) - Rapport du flux énergétique ou lumineux transmis au flux incident

FLUX ENERGETIQUE - Puissance émise, transportée ou reçue sous forme de rayonnement. Unité : watt (W)

FLUX LUMINEUX - Capacité d'une source de produire une sensation lumineuse. Unité = lumen (lm).

INTENSITE LUMINEUSE - Quotient du flux lumineux émis par unité d'angle solide (stéradian) dans une certaine direction par la valeur de cet angle solide. Unité : candéla (cd). 1 candéla = 1 lumen par stéradian. ($\text{lm}\cdot\text{stéradian}^{-1}$).

LAMPE - Source construite en vue de produire de la lumière.

LAMPE A INCANDESCENCE - Lampe dans laquelle l'émission de lumière est produite au moyen d'un corps porté à l'incandescence par le passage d'un courant électrique.

LAMPE A HALOGENE - Lampe à incandescence à atmosphère gazeuse qui contient une certaine proportion d'halogènes (lampe à l'iode, par exemple).

LAMPE A DECHARGE - Lampe dans laquelle la lumière est produite par décharge électrique dans un gaz, une vapeur métallique ou un mélange par plusieurs gaz et vapeurs.

LAMPE FLUORESCENTE - Lampe à décharge dans laquelle la lumière est émise surtout par une couche de substance fluorescente excitée par le rayonnement ultraviolet de la décharge.

LONGUEUR D'ONDE (λ) - Distance entre deux points successifs où la phase est la même. Unité: mètre (m).

LUMIERE - Energie radiante capable d'exciter la rétine et de produire une *sensation visuelle*. La portion visible du spectre de l'énergie radiante se situe entre 380 et 770 nm.

LUMINAIRE (*light fitting, fitting*) - Appareil d'éclairage. Ensemble mécanique, électrique et optique destiné à modifier la distribution lumineuse des lampes qui comprend toutes les composantes nécessaires pour fixer et protéger les lampes et pour les relier aux circuits d'alimentation.

LUMINANCE (dénommée auparavant brillance photométrique) - Quotient du flux lumineux quittant, atteignant ou traversant un élément de surface en ce point, et se propageant dans des directions définies par un cône élémentaire contenant la direction donnée, par le produit de l'angle solide du cône et de l'aire de la projection orthogonale de l'élément de surface sur un plan perpendiculaire à la direction donnée. Unité = candéla par mètre carré ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$).

LUMINANCE ENERGETIQUE (*radiance*) - Quotient du flux énergétique quittant, atteignant ou traversant un élément de surface en un point sur le trajet d'un faisceau.

LUMINANCE DE VOILE (*veiling luminance*) - Luminance superposée à l'image rétinienne qui réduit le contraste de cette image. L'effet de voile, produit par des sources ou zones à luminance élevée dans le champ visuel, se manifeste par une diminution de la performance visuelle et de la visibilité.

LUMINOSITE (*brightness*) - Intensité de la sensation lumineuse provenant d'une surface. Correspondant psychosensoriel approximatif de la grandeur photométrique *luminance*. Dépend de la luminance de l'objet et de l'adaptation de l'oeil.

PARALUME . ECRAN PARALUME (*louvre ; spill shield UK ; louver USA*) - Ecran formé d'éléments translucides ou opaques géométriquement disposés, de façon à masquer les lampes à la vue directe, sous un angle déterminé.

PERCEPTION VISUELLE - Interprétation des impressions transmises par la rétine au cerveau en termes d'information sur le monde physique étalé devant les yeux.

Note : La perception visuelle (d'un objet) comporte plusieurs opérations : reconnaître sa présence ; localiser sa position dans l'espace ; observer ses relations avec d'autres objets ou événements ; identifier sa couleur, ses mouvements, sa luminosité ou sa forme.

PERFORMANCE VISUELLE - Evaluation quantitative de la rapidité et la précision d'exécution d'une tâche visuelle.

PHOTOMETRIE - Mesure des grandeurs relatives aux rayonnements, évaluées selon l'impression visuelle produite par ceux-ci et sur la base de certaines conventions.

PLAN DE TRAVAIL - Plan horizontal, vertical ou incliné sur lequel se trouve la tâche. En l'absence d'autres indications, il doit être considéré à 0.70 m hauteur du sol pour un travail assis et à 0.85 m pour un travail debout. S'il s'agit uniquement de déplacements (corridors, parking), le plan de travail est au niveau du sol.

PROBABILITE DE CONFORT VISUEL (*Visual Comfort Probability - VCP*) - Evaluation d'un système d'éclairage exprimé en pourcentage des personnes qui, en regardant d'une certaine place dans une certaine direction, considère cet éclairage comme acceptable du point de vue de l'éblouissement gênant. *Visual Comfort Probability - VCP* se réfère donc à l'évaluation de l'éblouissement gênant (*Discomfort Glare Rating - DGR*).

RADIATION MONOCHROMATIQUE - Radiation caractérisée par une seule fréquence. Par extension, rayonnement s'étendant sur un très petit domaine de fréquences ou de longueurs d'onde.

RADIOMETRIE - Mesurages des grandeurs relatives aux rayonnements.

RAYONNEMENT [radiation] - Emission ou transport d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules.

RAYONNEMENTS OPTIQUES - Rayonnements électromagnétiques (photons) dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 770 nm (domaine de transition entre les rayons X et les ondes radioélectriques). Rayonnement visible = lumière.

REFLECTEUR - Dispositif servant à modifier la répartition spatiale du flux lumineux d'une source en utilisant essentiellement le phénomène de réflexion.

REFLEXION (*reflection*) - Terme général utilisé pour définir le processus par lequel le flux incident est renvoyé par une surface ou un milieu sans changement de fréquence des rayonnements monochromatiques qui entrent dans sa composition.

REFLEXION DE VOILE (*veiling reflection*) - réflexions spéculaires superposées aux réflexions diffusées d'un objet et qui obscurcit les détails en diminuant le contraste (éblouissement par réflexion).

REFLEXION SPECULAIRE - Réflexion sans diffusion obéissant aux lois optiques valables pour les miroirs.

RENDU DE COULEUR (*Colour rendering*) - Expression générale pour l'apparence des objets éclairés par une lampe spécifique comparée avec leur apparence lorsqu'ils sont éclairés par une lampe de référence.

SPECTRE (d'un rayonnement) - Répartition spatiale d'un rayonnement complexe résultant de la séparation de ses composants monochromatiques.

SYSTEMES DE CONTROLE (*Control systems*) - Systèmes qui contrôlent l'allumage et/ou l'atténuation d'une installation d'éclairage

TACHE VISUELLE - Désigne, de manière conventionnelle, les détails et les objets qui doivent être vus pour effectuer une activité donnée ainsi que le fond (arrière-plan) de ces objets avec les détails.

TEMPERATURE DE COULEUR - Température du corps noir qui émet un rayonnement ayant la même chromaticité que le rayonnement considéré. Unité : kelvin (K).

VISIBILITE - Qualité ou état d'être percevable par l'oeil. Dans les applications extérieures, la visibilité se réfère à la distance à laquelle un objet est à peine perçu. Dans les applications intérieures, la visibilité se réfère au contraste ou à la taille d'un objet test standard, observé dans des conditions standard, ayant le même seuil que l'objet donné.