

FACULTE DE BIOLOGIE ET DE MEDECINE

Développement d'un modèle psychophysique prédictif pour optimiser les conditions visuelles au poste de travail

Thèse de doctorat

présentée à la

Faculté de Biologie et de Médecine
de l'Université de Lausanne

par

Francioli David

Physicien diplômé
de l'Université de Genève

Jury

Prof. Jacques Dubochet, Président et Rapporteur
Dr. Jean-Jacques Meyer, Directeur de thèse
Dr. Marino Menozzi, expert
Dr. Raphaël Compagnon, expert

Lausanne
2004

RESUME

Le sujet de notre recherche, qui s'inscrit dans le cadre de l'ergonomie visuelle, a pour objectif la conception de nouveaux indicateurs de confort visuel. Ici la notion de confort fait référence à des conditions lumineuses adaptées à l'exécution d'une tâche caractérisée par une certaine exigence d'acuité. L'évaluation des conditions visuelles se fait sur la base de critères d'optimisation de la visibilité et de minimisation de la gêne par éblouissement. En effet, l'analyse ergonomique a révélé que les recommandations actuellement en vigueur, et leurs modèles sous-jacents, ne garantissent pas une adaptation suffisante des conditions lumineuses pour les postes de travail à haute charge visuelle, à savoir le travail sur écran, les postes de contrôle de qualité et la conduite nocturne, ceci pour les raisons suivantes.

Premièrement, ces recommandations ne tiennent pas suffisamment compte des facteurs suivants: 1) la distribution de lumière qui caractérise le champ visuel perçu; 2) l'éclairage vertical au niveau des yeux; 3) le profil visuel établi par des tests ergophtalmologiques suffisamment sensibles d'une population active, dont l'âge moyen augmente. Ce sont autant de facteurs qui engendrent un manque de visibilité que l'on ne peut traiter indépendamment de l'éblouissement.

Deuxièmement, les modèles existants ne rendent pas suffisamment compte de l'éblouissement par la lumière naturelle qui intervient par la présence de grandes surfaces vitrées. C'est dans le cadre du projet pluridisciplinaire LUMEN initié en 1990 et dont l'objectif était une meilleure utilisation de la lumière naturelle, que les ergonomes ont suggéré de fournir aux ingénieurs et architectes de nouveaux indices, plus globaux pour optimiser l'utilisation de la lumière naturelle dans les locaux de travail. Suite à une première modélisation qui a abouti à l'élaboration d'un premier indice, le J-index, il s'est avéré nécessaire de valider plus fondamentalement les relations entre acuité et éblouissement dans des conditions représentatives de la sollicitation réelle des travailleurs.

Trois expériences, se distinguant par leur degré de conformité à la réalité du terrain, ont été réalisées. La première étude s'est déroulée dans un local prototype permettant ainsi d'étudier le mélange de lumière artificielle et naturelle. La deuxième étude a eu lieu directement sur le terrain avec l'évaluation en continu de conditions lumineuses de deux sujets à leur poste de travail. La troisième étude a été menée entièrement en laboratoire (en lumière artificielle), permettant un contrôle précis de la lumière.

Ces expérimentations ont nécessité tout d'abord de constituer un groupe de sujets suffisamment représentatif de la population active et ensuite, de développer un certain nombre d'outils: 1) des questionnaires informatisés; 2) un logiciel de test visuel sur écran permettant de déterminer une courbe "acuité – contraste" pour un individu; 3) un test visuel sur une table lumineuse (tables d'acuités allant de 1 à 20 dixièmes et luminance de fond réglable entre environ 1 et 7000 cd/m², et possibilités de tester contrastes positifs et négatifs); 4) un photoluminancemètre numérique permettant de mesurer la distribution de lumière du champ visuel (sur en fait 180°) à l'aide de 7 photographies numériques.

La recherche a permis d'élaborer quatre indices de confort visuel présentés sous la forme de probabilité P de gêne pour un individu donné, défini par son profil visuel. Ces indices évaluent le rôle joué par les 4 facteurs d'inadaptation suivants: 1) la tâche manque de lumière (PMT); 2) la tâche est éblouissante; 3) l'environnement lumineux est éblouissant; 4) le manque de visibilité en relation avec l'exigence d'acuité (PMP). Tous ces indices dépendent de la distribution de luminances dans le champ visuel, de l'éclairage reçu par les yeux et du profil visuel des individus. De plus ils sont nuancés (valeurs allant de 0 à 100) et comparables entre eux, ce qui permet un traitement plus global de l'inconfort visuel, comme le suggérait le J-index.

En ce qui concerne l'acuité, le modèle basé sur la MTF (modulation transfert fonction) , bien connue des psychophysiciens, ouvre une voie pour mieux comprendre le mécanisme qui régit l'acuité visuelle en situation réelle. Cette relation pourra être étudiée plus en détail grâce à un nouvel outil de test visuel en cours de finalisation. Cet outil, appelé ergovisiomètre, correspond à une nouvelle version modernisée du test de référence C45 utilisé dans cette étude pour définir le profil visuel des sujets.

REMERCIEMENTS

Ce travail fait partie d'une recherche financée par le FNRS, crédit no 3200-057039.99. Je voudrais ici remercier les nombreuses personnes qui ont collaboré dans ce travail:

- **Dr. Jean-Jacques Meyer**, directeur de cette thèse, qui a toujours été depuis 1990 un soutien inconditionnel et éclairé pour moi, c'est lui qui m'a donné l'intérêt et la passion pour ce domaine de la recherche,
- **Professeur Paule Rey**, initiatrice du projet LUMEN, point de départ en 1990 de toute cette recherche,
- Monsieur **Hendrik Kerkhoven** dont l'aide technique a été précieuse dans l'élaboration du dispositif expérimental (il a été entre autres le concepteur initial des panneaux lumineux)
- **Dr. Laurent Michel** qui a pris une part prépondérante dans l'organisation de l'expérience, le lien avec le laboratoire d'énergie solaire (LESO), et son travail capital sur l'ergovisionnaire,
- Messieurs **Christian Roecker**, adjoint scientifique au LESO, et **Pierre Loesch** qui ont élaboré les concepts électro-mécaniques concernant les panneaux lumineux, la table lumineuse, et l'ergovisionnaire,
- **Drs. Gilles Courret et Antoine Guillemin**, dont les collaborations m'ont permis de développer questionnaires et test visuel sur écran,
- **Professeur Jean-Louis Scartezzini**, directeur du LESO, qui a permis la collaboration entre nos deux laboratoires, et notamment nous a mis à disposition toute l'infrastructure des locaux prototypes DEMONA,
- **L'Institut Universitaire Romand de Santé au Travail (IURST)** qui a été le principal soutien de l'ensemble de notre recherche,
- **Viviane Gonik, Sandrine Kurth** mes collègues qui m'ont beaucoup aidé et soutenu tout au long du travail,
- **Carine Joly**, qui m'a apporté à un moment crucial son aide précieuse en ce qui concerne les traductions en anglais,
- **Patrick Grandchamp**, qui nous a permis d'acquérir l'appareil numérique et surtout l'objectif fish-eye qui n'existait plus sur le marché à l'époque,
- Toutes les personnes, collègues ou amis qui m'ont aidé pour finaliser ce travail
- **Ma famille, mes parents, mes sœurs, ma fiancée** qui m'ont toujours soutenu
- **Tous les membres du jury** qui ont montré de l'intérêt pour cette recherche, et qui par leur expertise ont contribué à en améliorer la qualité.

SOMMAIRE

Chapitre I: Introduction		p8
	Objectifs et contexte de l'étude	p8
	La signification d'un indice global	p8
	Les données du terrain	p9
	Etudes de suivi sur le terrain	p9
	Simulation du travail sur écran dans un bureau prototype	p10
	Expérience en laboratoire fermé	p10
Chapitre II: Problématique		p11
2.1 Etat de la question		p11
2.1.1	La recherche en ergonomie visuelle et ses bases	p11
2.1.2	L'adaptation des conditions lumineuses	p11
2.1.3	Eclairagisme et architecture	p13
2.1.4	Critères de performance visuelle	p13
2.1.4.1	La courbe acuité-luminance comme base pour l'éclairage des tâches	p14
2.1.4.2	Les normes d'éclairage	p15
2.1.4.3	Le contraste "entourage – tâche"	p18
2.1.4.4	Nécessité de disposer d'échelles d'appréciation	p18
2.1.4.5	Contraste positif, contraste négatif	p19
2.1.4.4	Le test ergophtalmologique C45	p20
2.1.5	Critères d'éblouissement	p22
2.1.5.1	Définitions	p22
2.1.5.2	Eblouissement et champ visuel	p22
2.1.5.3	L'indice d'éblouissement UGR	p23
2.1.6	Couleurs, température de couleur et courbes de Kruithof	p23
2.1.7	Résumé	p26
2.2 Hypothèses		p27
2.2.1	Préambule	p27
2.2.2	Modèle J-Index et PIV	p27
2.2.3	Modèle de l'acuité utilisant la "Modulation Transfert Fonction"	p30
2.2.4	Eblouissement d'inconfort	p34
2.2.4.1	Indicateur UGR	p34
2.2.4.2	Amélioration du modèle de Weber-Fechner pour la lumière	p34
Chapitre III: Méthode expérimentale		p37
3.1: Introduction		p37
3.2: Expérience de laboratoire		p37
3.2.1	Dispositif expérimental	p37
3.2.1.1	Cas général des séances 1-8	p37
3.2.1.2	Particularités de la séance 9	p39
3.2.2	Calibrage des ambiances lumineuse Et choix des situations expérimentales	p40
3.2.2.1	Calibrage général des luminances et des éclairages	p40
3.2.2.2	Sélection des situations de l'expérience	p43
3.2.2.3	Calibrage spécifique à la séance 9	p46
3.2.3	Protocoles des séances	p50
3.2.3.1	Séances 1 à 4: performance et Perception visuelle sur l'écran	p50
3.2.3.2	Séances 5 à 8: performance sur table lumineuse	p51
3.2.3.3	Séance 9: Réglage d'une lampe sur pied	p51
3.2.3.4	Séance 10: éblouissement global	p52
3.3: Expérience en local prototype		p52
3.3.1	Dispositif expérimental	p52
3.3.2	Déroulement de l'expérience	p53

3.4:	Expérience de suivi	p54
3.4.1	Dispositif expérimental	p54
3.4.2	Déroulement de l'expérience	p55
3.5:	Recrutement des sujets	p56
3.6:	Outils développés	p62
3.6.1	Préambule	p62
3.6.2	Questionnaires	p62
3.6.2.1	Questionnaire relatif aux plaintes visuelles	p63
3.6.2.2	Questionnaires pour l'expérience en laboratoire	p64
3.6.2.3	Questionnaires pour l'expérience en local Prototype	p65
3.6.2.4	Questionnaires pour l'expérience de suivis	p66
3.6.3	Test sur écran	p67
3.6.3.1	Préambule	p67
3.6.3.2	Présentation du test	p68
3.6.3.3	Calibrage du contraste	p69
3.6.4	Test sur table lumineuse	p72
3.6.4.1	Conception de la table lumineuse	p72
3.6.4.2	Calibrage de la table lumineuse	p72
3.6.4.3	Optotypes	p73
3.6.4.4	Procédure du test	p73
3.6.5	Photoluminancemètre numérique	p74
3.6.5.1	Présentation de l'appareillage	p74
3.6.5.2	Calibrages	p75
3.6.5.3	Procédure de mesures photométriques	p80
3.7:	Méthodes statistiques	p82
3.7.1	Ajustements à plusieurs variables (2 ^{ième} phase)	p82
3.7.1.1	Méthode des ajustements linéaires	p82
3.7.1.2	Ajustements non-linéaires	p84
3.7.2	Test de linéarité (validation d'un modèle: 3 ^{ième} phase)	p85
3.7.3	Estimation de probabilités (4 ^{ième} phase)	p87

Chapitre IV:	Résultats	p90
4.1:	Préambule	p90
4.2:	Expérience dans le local prototype	p90
4.2.1	Caractéristiques physiques de la situation expérimentale	p90
4.2.1.1	Conditions lumineuses	p90
4.2.1.2	Variation des conditions thermiques	p95
4.2.2	Réponses des sujets	p96
4.2.2.1	Impressions de confort en terme de "chaud" et de "froid"	p96
4.2.2.2	Influence des conditions climatiques	p100
4.2.2.3	Réponses exprimant la sensation de luminosité	p102
4.2.2.4	Eblouissement	p116
4.2.2.5	Acuité visuelle et perception de la luminosité	p119
4.2.3	Synthèse des résultats du local prototype	p124
4.2.3.1	Température de couleur, effet Kruithof	p124
4.2.3.2	Réglages des luminaires	p125
4.2.3.3	Perception de luminosité	p125
4.2.3.4	Effet d'éblouissement	p125
4.2.3.5	Acuité visuelle et confort	p125

4.3:	Expérience de suivis	p126
4.3.1	Luminosité et éblouissement	p126
4.3.2	Plaintes visuelles	p128
4.4:	Expérience en laboratoire	p130
4.4.1	Préambule	p130
4.4.2	Etude du sentiment de luminosité	p130
4.4.2.1	Ecran	p132
4.4.2.2	Document imprimé	p133
4.4.2.3	Tâche: écran + document imprimé	p134
4.4.2.4	Amélioration de la prédiction du sentiment de luminosité	p135
4.4.2.5	Application du modèle aux situations de l'expérience	p138
4.4.2.6	Application du modèle par rapport aux sujets	p140
4.4.3	Eblouissement	p142
4.4.3.1	Eblouissement lié à la tâche	p142
4.4.3.2	Eblouissement lié à l'environnement (séance 10)	p144
4.4.4	Acuité visuelle et confort visuel	p151
4.4.4.1	Acuité en contraste positif	p151
4.4.4.2	Acuité en contraste négatif	p155
Chapitre V:	Discussion	p159
5.1:	Résumé des résultats	p159
5.1.1	Sentiment de luminosité (SL)	p159
5.1.2	Sentiment d'éblouissement du à l'environnement (SEGS)	p160
5.1.3	Effet de l'environnement sur l'acuité	p161
5.1.4	Expression des indicateurs en terme de probabilité	p161
5.1.5	Généralisation de l'application des indicateurs de prédiction	p162
5.1.6	Effet Kruehthof	p163
5.2:	Méthode de mesure pour l'évaluation des indices	p163
5.3:	Utilisation des indicateurs d'inconfort pour des recommandations	p164
5.4:	Quelques exemples provenant du terrain	p171
5.5:	Fatigue visuelle	p174
Chapitre VI:	Conclusion	p175
Chapitre VII:	Références bibliographiques	p177
Annexes		p183
A-1:	Calculs statistiques	p183
A-1.1	Variance des paramètres de l'estimation d'un ajustement linéaire	p183
A-1.2	moyenne et écart-type d'une variable dont le logarithme suit une loi normale	p184
A-1.3	Estimation de paramètres pour un ajustement non linéaire	p187
A-1.4	Ajustement non linéaire: exemple de la courbe acuité contraste	p189
A-1.5	Test de linéarité	p191
A-1.6	Démonstration formule de PGG	p192
A-2:	MTF (Modulation Transfert Function)	p193
A-2.1	MTF cas général, analyse de Fourier	p193
A-2.2	MTF cas de l'œil	p194

A-3:	Définitions	p195
	A-3.1 Grandeurs photométriques	p195
	A-3.2 Grandeurs physiologiques	p199
A-4:	Nomenclature des variables	p201
	A-4.1 Variables physiologiques	p201
	A-4.2 Variables photométriques	p202
	A-4.3 Variables liées à la perception	p202
	A-4.4 Probabilités	p203
A-5:	Champs visuels présentés au cours de l'expérience, photographies et mesures	p203
	A-5.1 Echelles d'appréciation des données	p203
	A-5.2 Expérience en local prototype	p206
	A-5.3 Expérience en laboratoire (16 situations)	p211
	Curriculum vitae	p227

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Objectifs et contexte de l'étude

Le sujet de notre recherche, qui s'inscrit dans le cadre de l'ergonomie visuelle a pour objectif la conception de nouveaux indicateurs de confort visuel. L'ergonomie est une science appliquée interdisciplinaire qui étudie le travail dans le but d'en améliorer les conditions pour éviter des risques pour la santé, garantir un confort suffisant et assurer un certain rendement (réf. [50], [36], [81]). Ses bases sont la physiologie du travail et la psychologie du travail ainsi que la sociologie de l'homme au travail. L'ergonomie visuelle est étroitement liée à l'ergophtalmologie qui se préoccupe de la prévention des risques oculaires, de l'évaluation des performances requises pour le travail ainsi que des corrections optiques susceptibles d'améliorer la vue (l'optique physiologique) pour les diverses activités de travail et de déplacement (réf. [100], [91], [63], [18], [57], [74], [93]). Dans notre cas, la notion de confort visuel fait référence à des conditions lumineuses adaptées à l'exécution d'une tâche caractérisée par une certaine exigence d'acuité. Cela signifie que les indicateurs dont il est question devraient permettre de vérifier qu'un sujet donné voit suffisamment sans être gêné par un éblouissement ou par une qualité insuffisante des sources de lumière. Ces conditions n'étant pas remplies, on devrait pouvoir déduire de ces indicateurs l'acceptabilité de l'inconfort subi ou le pourcentage de sujets (notion probabiliste) susceptibles d'être gênés dans une situation donnée. Mais, pour l'ergonome, le bilan d'une analyse est plus qu'un simple constat. Il doit essentiellement servir à suggérer les modifications qui s'imposent et à fournir des recommandations aux concepteurs des locaux et des postes de travail. En ergonomie visuelle, les critères se rapportent, d'une part, à des paramètres photométriques qui relèvent de l'éclairagisme et, d'autre part, à des critères objectifs et subjectifs qui relèvent de la physiologie visuelle et de l'ergophtalmologie. Les critères d'inadaptation qui permettent de classer les tâches en terme de visibilité, de risques pour la vue et de gêne à l'éblouissement sont à la fois objectifs et subjectifs. On entend par "objectif", un manque de performance ainsi que la présence de fatigue visuelle et de signes d'asthénopie visuelle, même si ces derniers sont relevés par questionnaire (réf. [100], [61], [37], [66], [59], [67]). Sont considérés comme "subjectifs" des sentiments de gêne ou d'inconfort plus ou moins consciemment ressentis. Cette gêne est liée au sentiment d'éblouissement, au sentiment d'un manque ou d'excès de lumière ou de contraste, au ressentir d'une ambiance lumineuse trop froide ou trop chaude ou encore qui vibre désagréablement (réf. [31], [16], [3], [89], [6], [78]).

La signification d'un indice global

En situation de travail et notamment dans le cas des postes à forte charge visuelle qui comprend le travail sur écran, le contrôle de qualité et la conduite nocturne de véhicule, les causes d'inconfort visuel et de souffrance oculaire sont multiples, cela a été démontré par de nombreuses études [61],[37],[66],[59],[67] et c'est précisément la tâche première des ergonomes d'en dépister les causes. Cela signifie qu'il dispose, pour son analyse, d'indicateurs photométriques et spatiaux qui rendent compte de la sollicitation des mécanismes physiologiques et psychologiques soumis à la durée et aux exigences de rendement au travail. Il ne s'agit cependant pas d'une simple addition d'effets mais d'une interaction de mécanismes physiologiques et psychologiques soumis à la variabilité biologique que cherche à simuler la modélisation d'un indice global d'inconfort (réf. [92], [68], [69], [70], [72], [26], [71], [27], [28]).

On pourrait cependant douter a priori de l'utilité pratique d'un indice global de confort. Tout d'abord, il n'est pas sans intérêt de savoir évaluer le sentiment d'inconfort visuel qui est lui-même assez global et relativement diffus. Ensuite, un indice global susceptible d'indexer un poste de travail un local, voir un bâtiment représente un intérêt indéniable pour établir des bilans et des comparaisons avant et après modification d'un site. Il est vrai toutefois que l'indice, représenté ici par un taux de sujet insatisfaits, ne dit pas en lui-même ce qui serait à modifier. De fait, les composants ne sont pas perdus, car l'équation, entièrement

transparente, contient tous les ingrédients qui aboutissent à l'indexation et qui servira aussi à établir des intervalles d'acceptabilité de divers paramètres photométriques. Mieux, la pondération des composants et leur contribution dans une situation donnée permettra précisément de distinguer l'individuel du collectif ainsi que l'essentiel du secondaire. Car dans la pratique, il s'agira de modifier en priorité les facteurs les plus importants et aussi ceux que l'on peut d'abord aisément modifier. La modélisation proposée répond en effet au problème majeur de la pertinence des valeurs relevées, ceci non seulement en terme de signification dans l'arbre des causes, mais aussi par leur signification statistique dès lors qu'il s'agit de paramètres soumis à de nombreuses sources de variation. Il faut néanmoins bien distinguer la globalité de l'indice d'inconfort de l'approche globale multifactorielle de terrain qui donne essentiellement des associations entre facteurs relatifs aux effets pris en compte supposés et ceux "illustratifs" (réf. [21], [52]) supposés à déterminer. A noter que les relations supposées par les associations mises en évidence sont vérifiées par les méthodes courantes d'analyse épidémiologique (réf. [82], [90]). L'analyse factorielle est un préalable à la modélisation et aussi un outil pour en vérifier le succès. Le modèle, basé sur des données initiales de terrain et des expériences de simulation en laboratoire prend en compte, d'une part, les paramètres physiologiques et psychologiques qui déterminent le bien-être visuel et, d'autre part, leur modulation par les phénomènes de variabilité biologique.

Les données du terrain

Les évaluations transversales recueillies sur le terrain tout au long de plusieurs années consécutives fournissent une très bonne image, d'une part, de la souffrance oculaire, et d'autre part, des innombrables situations que l'analyse ergonomique a jugé, par comparaison avec le savoir acquis, comme inadaptées (réf. [51], [59], [60], [61], [62], [65], [66], [67], [72], [73], [75]). On peut supposer que le collectif de plus de 1500 observations réunies pour cette étude est représentatif en terme de conditions d'illumination, de charge de travail et de présence de signes de souffrance oculaire. Néanmoins, les associations sont bien moins bonnes avec les signes d'inconfort visuel exprimés, en relation avec la situation du moment (réf. [77]).

Pourtant, l'intérêt de l'ergonome est de prévenir les effets durables indésirables en se basant sur les effets observables à court terme, susceptibles de les engendrer. C'est pour cette raison que l'inconfort et une gêne immédiate de visibilité représentent des indicateurs précieux. Mais rappelons aussi, en passant, que le bien-être est reconnu par l'OMS (réf. [85]) comme une composante de la santé. Toutefois, sur le terrain, l'inconfort est difficile à mesurer et il en va de même de l'évaluation de la performance de lecture par rapport à l'acuité exigée. D'une part, les sujets sont soumis aux effets d'adaptation et d'accommodation et, d'autre part, l'approche de l'interface homme-tâche (réf. [36], [76], [88]) en situation de travail reste problématique aussi bien pour l'expérimentateur que pour le travailleur. Il est donc nécessaire de compléter ce chaînon manquant de l'analyse par diverses investigations ou expériences contrôlées. C'est ainsi que nous avons basé notre démonstration sur trois types d'expérimentation: une étude d'un suivi sur le terrain, une étude d'évaluation dans un local prototype et enfin l'étude paramétrique de simulation en laboratoire.

Etudes de suivi sur le terrain

Pour observer les fluctuations journalières, voire hebdomadaires des facteurs pris en compte, il est possible, de faire des observations de suivi. La limitation réside néanmoins dans le peu de paramètres qu'il est possible d'enregistrer sans perturber par trop le travail (réf. [61]). D'autre part, les sujets susceptibles de participer à ce type d'évaluation sont généralement peu nombreux. Il reste donc à effectuer suffisamment d'observations de terrain pour en reproduire les principales caractéristiques en situation simulée. Mais on pourra alors surtout saisir des effets qui se manifestent à court terme.

Simulation du travail sur écran dans un bureau prototype

Dans un local prototype ou pilote, il est possible d'aménager un poste de travail représentatif de ceux qui font problèmes sur le terrain et de le faire expérimenter, en situations instantanées, par des opérateurs "cobayes" . Il faudra alors réunir un groupe de sujets représentatifs de la population de travail. Ce qui fera l'intérêt de ce type d'expérimentation en sera aussi sa limitation : avec un local muni de fenêtres, on restera soumis aux aléas des variations météorologiques, tant du point de vue climatique (température, humidité,) que du point de vue lumineux (variation du rayonnement solaire, couverture nuageuse). Cette étape, intermédiaire entre le terrain et le laboratoire, est néanmoins indispensable, car elle permet de rendre compte des réactions des sujets aux conditions lumineuses dans des situations très proches de la réalité de terrain, ceci par l'intermédiaire de questions précises et de tâches standardisées. D'autre part, il est possible d'établir, au travers d'un examen ergophtalmologique, le profil visuel de sujets sélectionnés pour être représentatifs de la population des travailleurs.

Expérience en laboratoire fermé

L'analyse des paramètres lumineux qui déterminent la performance et le confort visuel nécessite l'expérimentation en laboratoire fermé. A noter que ces conditions basiques de la stimulation lumineuse, peuvent se rapprocher du cas du travail sur écran en condition de lumière artificielle. Nous nous sommes intéressés à l'effet de larges surfaces lumineuses (simulation de fenêtres), plutôt qu'à celui de sources ponctuelles d'un éclairage artificiel mal agencé. Ce dernier aspect est mieux connu en terme de gêne, ayant donné lieu à de nombreuses recherches chez les éclairagistes anglo-saxons dont notamment les travaux de Guth (Réf. [40], [41], [42]). Ce qui est cependant moins connu, ce sont les effets de contraste entre la tâche et son environnement ainsi que celui de la présence de larges sources de lumière. C'est à Lythgoe (réf. [56]) que l'on doit l'étude, en situation de simulation, du contraste entre la tâche et son environnement. Les résultats de ce pionnier, reproduits dans certains ouvrages d'éclairagisme (réf. [89]) ou de biophysique (réf. [38]) sont cependant difficiles à interpréter et à mettre en application sur le terrain.

Un autre aspect caractéristique des recherches entreprises par des ingénieurs, en dehors de la démarche des ergonomes, c'est d'avoir utilisé des populations de références, souvent des étudiants, qui ne sont pas suffisamment représentatives de la population active, plus ou moins bien corrigée et susceptible de devoir faire face à une très grande variation de conditions lumineuses avec des tâches qui impliquent des directions du regard et des distances fixes. L'ergonome a, lui, l'obligation de prendre en compte, par l'intermédiaire de ses analyses de terrain, les facteurs de risque liés à une activité donnée et au profil visuel des populations réellement exposées. C'est ainsi que la problématique de notre recherche répond à la nécessité de valider et de généraliser les solutions de pionnier souvent imaginées par des ergonomes qui, depuis l'apparition rapide et massive des écrans, ont été confrontés aux plaintes visuelles des opérateurs affectés à des postes pourtant souvent aménagés selon les recommandations en cours. C'est ainsi que nous avons pu bénéficier de leurs nombreuses analyses de terrain et, en particulier, du récent développement en ergophtalmologie de tests d'évaluation des performances qui simulent mieux que les tables d'acuité courantes les travaux à forte exigence visuelle pratiqués dans des conditions lumineuses qui s'éloignent de celles d'un bureau bien éclairé où l'on utilise des documents papiers (réf. [62], [64]).

CHAPITRE II

ETAT DE LA QUESTION ET HYPOTHESES

2.1 Etat de la question

2.1.1. La recherche en ergonomie visuelle et ses bases

Les recherches en ergonomie consistent essentiellement à établir des relations entre traces non désirées de l'activité, dont les signes d'astreinte excessive et leurs déterminants sous forme de contraintes (ou de charges) liées aux sujets et à la situation de travail (réf. [88], [76]).

Les ergonomes ont classé les contraintes en quatre catégories: 1) les contraintes physiques; 2) les contraintes sensorielles; 3) les contraintes mentales et 4) les contraintes psychosociales. On pourrait penser que, s'agissant d'un poste de traitement d'information, les conditions lumineuses ne concernent que les contraintes sensorielles et mentales. De fait, l'analyse factorielle a mis en évidence, tant au niveau des déterminants que des effets, de nombreuses interactions. Ainsi, le sentiment de confort visuel peut être influencé par les conditions posturales, le climat, le bruit, et, inversement, l'optimisation des conditions lumineuses peut se faire au détriment des conditions thermiques et sonores. Il n'en reste pas moins que, dans le cas des postes de traitement d'information, de bonnes conditions lumineuses représentent, au côté de bonnes conditions spatiales de présentation de l'information, les conditions nécessaires pour assurer le confort visuel (réf. [74]).

Les exigences de confort visuel sont, à la fois, d'ordre lumineux et spatial. La dimension spatiale concerne les caractéristiques angulaires du champ et la distance de perception. Dans cette étude, nous avons considéré uniquement les surfaces lumineuses déterminant les images perçues, en ignorant les problèmes d'accommodation à la distance ou, plutôt, en admettant l'astreinte de fixation du regard liée à de fortes intensités de travail pour une population tout venant plus ou moins bien corrigée pour les distances de lecture exigées par le travail (réf. [57]).

2.1.2. L'adaptation des conditions lumineuses

La lumière contribue, avec le bruit et le climat, à définir un environnement de travail plus ou moins agréable. Mais son et lumière interviennent tout d'abord au niveau de la tâche à accomplir en tant que supports du traitement de l'information. La lumière intervient spécifiquement au niveau de la performance de lecture dont un déficit engendre une sollicitation excessive de nos yeux et, par là même, contribue à l'inconfort visuel. De plus, la lumière, qui nous permet de bien voir, peut aussi jouer un rôle indirect dans la régulation thermique dont dépend notre sentiment de confort. Cette interférence intervient particulièrement avec le contrôle de la lumière naturelle. En effet, il faut se protéger de la chaleur engendrée par le rayonnement solaire direct et, parfois même, l'utiliser pour économiser de l'énergie. Par exemple, c'est parce qu'on a récemment recommandé aux architectes de favoriser l'utilisation de la lumière naturelle que les ergonomes ont jugé nécessaire, au travers d'un projet pluridisciplinaire Lumen (réf. [92]), de fournir aux architectes des critères photométriques et leurs outils d'évaluation pour concevoir des locaux confortables et éclairés correctement en fonction des postes de travail qu'ils abritent et qui, aujourd'hui dans le secteur tertiaire, impliquent l'utilisation de terminaux d'ordinateur.

De bonnes conditions lumineuses sont caractérisées principalement par une quantité correcte de lumière permettant une bonne visibilité de la tâche et l'absence d'éblouissement dû aux sources de lumière dans le champ visuel. D'autres paramètres, en rapport avec la qualité de la lumière, doivent être aussi pris en compte. C'est d'abord la couleur des locaux. Si des couleurs trop saturées entraînent des réactions physiologiques et psychologiques indésirables, elles ont tout d'abord une incidence sur la diffusion de la lumière (réf. [16], [31], [74]). En effet, certaines couleurs comme les rouges bordeaux et les bleus foncés et naturellement les bruns foncés ne réfléchissent que très peu de lumière. Interviennent aussi, dans le confort et l'aisance à voir, les spectres des tubes fluorescents (des mauvais spectres engendrent une difficulté de reconnaissance des couleurs et une

fatigue accommodative) et leur stabilité temporelle. Le papillotement de tubes fluorescents mal stabilisés, lequel peut interférer avec celui d'une fréquence de balayage trop basse d'un écran, est extrêmement fatigant. Il faut reconnaître que les constructeurs d'écran et de cartes vidéo ont, ces dernières années, considérablement augmenté les fréquences de balayage (réf. [9]). D'autre part, on dispose aujourd'hui de tubes fluorescents avec ballaste électronique à haute fréquence entièrement stables. Mais malgré ces améliorations, le problème principal reste la luminance relativement basse des écrans, leur vulnérabilité à la lumière incidente et leur position redressée qui élève l'axe du regard en direction des sources éblouissantes (réf. [63], [74]). Il est aisé d'admettre que de mauvaises conditions visuelles pour des tâches à forte exigence d'exploration visuelle, contribuent à accélérer la manifestation de la fatigue visuelle, de douleurs oculaires et de divers signes d'asthénopie. Un premier effet ressenti assez rapidement par le travailleur devrait être un sentiment de gêne qui lui signale la nécessité de modifier les conditions lumineuses. L'expérience de terrain montre que même si les dispositifs sont suffisamment individualisés, les opérateurs n'utilisent que très rarement tous les systèmes mis à disposition pour régler leur lumière (stores, régulation des lampes et de l'écran). Cela peut s'expliquer par la grande capacité d'adaptation de l'œil humain et aussi par des effets d'accoutumance. Les normes existantes, montrent que l'on sous-estime la variabilité des réactions aux conditions lumineuses et leurs multiples causes dont les effets de l'âge et ceux des défauts dioptriques largement répandus et plus ou moins bien corrigés en fonction des tâches. Comme le démontre les évaluations ergophtalmologiques chez des opérateurs sur écrans et des conducteurs, (réf. [64], [66]) les jeunes, ayant souvent une bonne vision, sont parfois plus sensibles à l'éblouissement que les sujets âgés qui, eux, ont perdu une certaine sensibilité. Mais ces derniers souffrent d'une diminution d'acuité et d'un besoin accru en lumière. La gêne à des sources d'éblouissement ponctuel dans un environnement peu lumineux est particulièrement accentuée par la présence de défauts dioptriques. Sachant que plus de 50% des travailleurs sont porteurs de corrections, il est évident que l'inconfort visuel lié à de mauvaises conditions lumineuses concerne une majorité des travailleurs (réf. [77]).

L'aménagement optimal d'un poste de travail nécessite donc impérativement de se préoccuper de l'adaptation des conditions lumineuses en tenant compte de ces facteurs de variabilité. Un autre problème est que l'on ne peut se contenter de considérer séparément le seul niveau d'éclairage de la tâche et le risque d'éblouissement. En effet, éblouissement et visibilité sont liés au niveau du champ visuel perçu. Pour cette raison, il est nécessaire d'établir des critères qui intègrent tout ces paramètres physiques et physiologiques susceptibles de jouer un rôle. De fait, notre démarche a été inspirée par celle de Fanger qui, lui, a décrit le confort thermique (réf. [22]). Il tenait compte de paramètres physiques (température sèche, température humide, humidité relative, vitesse du courant d'air) et de paramètres relatifs à l'individu (métabolisme, habillement, activité).

2.1.3. Eclairagisme et architecture

C'est aux ingénieurs et architectes que l'on demande de concevoir des bâtiments destinés à abriter des postes de travail. Alors que ce sont évidemment les architectes qui créent la forme, la structure et l'esthétique des bâtiments, ce sont les ingénieurs qui en étudient essentiellement les aspects techniques liés aux normes et obligations légales concernant les conditions thermiques, acoustiques et visuelles. A noter que les normes servent à garantir les minima requis plutôt qu'à assurer un confort suffisant. D'autre part, les divers aspects du confort ne peuvent être traités indépendamment et cela est particulièrement patent en ce qui concerne l'utilisation de la lumière naturelle et les mesures relatives au confort thermique prises pour se protéger du rayonnement solaire.

Si les critères relatifs aux contraintes thermiques et sonores sont généralement bien documentés dans les ouvrages d'ergonomie (réf. [36], [101]) et les normes (réf.[4]), il n'en va pas de même des conditions lumineuses. En effet, jusqu'à très récemment, les recommandations qui ont été élaborées par des sociétés d'éclairagisme se rapportent essentiellement à l'éclairage artificiel et ceci en terme de niveaux requis et de tolérance à l'éblouissement.

Ceci explique la description dans ces ouvrages de deux types de gêne à l'éblouissement: l'éblouissement perturbateur et l'éblouissement de gêne. Un type de gêne qui n'est mentionné que par les ergonomes, c'est la gêne associée à un sentiment de manque de lumière. D'autre part, surtout depuis l'introduction des écrans, les ergonomes ont dû se préoccuper de la gêne causée par des effets d'éblouissement liés à une mauvaise régulation de la lumière naturelle. Un autre type de gêne peu considéré par les éclairagistes est le sentiment de "froideur", ou de "chaleur" engendré par un choix inadéquat de tubes fluorescents. En effet, les tubes fluorescents sont caractérisés par leur spectre d'émission qui en détermine le rendement et les qualités colorimétriques. Or dès leur développement, Kruithof, un ingénieur de chez Philips (réf. [49]) avait étudié l'impact sur le confort visuel de l'association entre température de couleur et niveau d'éclairement. C'est la relation de Kruithof. De fait, les éclairagistes traitent indépendamment le rendu des couleurs recherché et le niveau d'éclairement requis en considérant en priorité le rendement lumineux.

Le problème est que ces trois types de gêne, éblouissement, manque de lumière et ambiance colorée peu agréable, sont évalués indépendamment les uns des autres, avec des critères qui ne permettent pas d'en évaluer la gêne relative. En effet, ce sont des phénomènes physiquement interdépendants qui, néanmoins, engendrent, pour le travailleur, un sentiment global d'inconfort dont l'intensité et les effets physiologiques et psychologiques varient en fonction de la nature de l'activité et de son intensité. Il faut mentionner que l'utilisation des affichages auto-luminescents des écrans d'ordinateur comportent une source de lumière supplémentaire, caractérisée par son spectre, sa vulnérabilité à la lumière incidente et sa luminosité limitée.

C'était précisément l'objectif du projet LUMEN (réf.[34], [92]) de fournir de nouveaux indicateurs mieux adaptés notamment pour les tâches à forte charge visuelle, en particulier celles exigeant l'utilisation d'un écran.

2.1.4. Critères de performance visuelle

Le critère le plus important d'adaptation des conditions lumineuses se rapporte à la performance d'acuité exigée et sa relation avec les conditions lumineuses de présentation de l'information.

Dans le modèle ergonomique, la performance visuelle, tout comme la sensibilité à la lumière, représente pour une tâche donnée, le paramètre individuel à considérer pour l'adaptation des conditions lumineuses. C'est de ces deux paramètres dont dépend la visibilité de la tâche caractérisée par la dimension des détails à percevoir, leur contraste avec le fond, l'éclairement qu'ils reçoivent ou leur luminance.

La relation entre performance et éclairement apparaît de façon la plus évidente dans le cas du texte imprimé qui a servi de base aux éclairagistes, mais que précisément l'usage des écrans a remis en cause. C'est ainsi que les tests d'acuité courants présentés sur table imprimée ont été remplacés par des tests dits ergophtalmologiques et conçus pour mieux simuler la sollicitation réelle des yeux. En particulier le test C45 (Réf. [62], [64]) a été spécialement conçu pour simuler le travail sur écran et toute tâche effectuée à bas niveau d'éclairement et en contraste inversé.

2.1.4.1. La courbe acuité-luminance comme base pour l'éclairage des tâches

La base de ce critère de visibilité est la courbe "acuité–luminance" (figure 2.1) qui a été mise en évidence à travers de nombreuses recherches, et dont l'une des premières, attribuée à König en 1897, a été reprise plus tard par Hecht en 1928 (réf. [53]). L'optotype utilisé à l'époque par König était un crochet de Snellen (voir définition dans l'annexe, § A-3.2.1).

La figure 2.1 montre que l'acuité visuelle augmente en fonction de la luminance du fond sur lequel se détache l'optotype. La courbe est constituée de 3 segments à chacun desquels correspondent des propriétés visuelles caractéristiques.

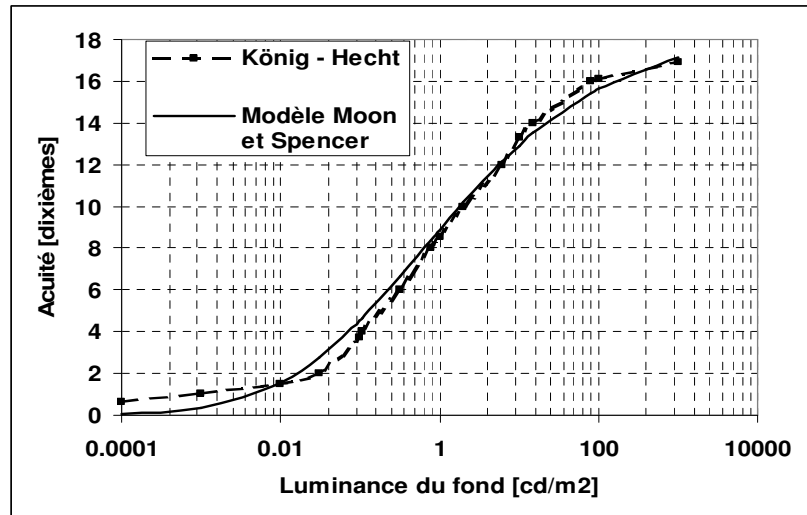


Figure 2.1 Relation entre l'acuité visuelle et la luminance du fond sur lequel l'optotype (crochet de Snellen) se détache. Les traits brisés correspondent aux mesures faites par König – Hecht (1928) et les traits pleins au modèle mathématique de Moon et Spencer (1944)(réf.[53]).

- *Le premier segment, caractérisé par des luminances inférieures à environ 0.1 cd/m², et des acuités inférieures à environ 0.16 correspond à la vision scotopique, pour laquelle ce sont essentiellement les bâtonnets (vision crépusculaire) qui fonctionnent. König et Uhtoff (réf. [53]) avaient vérifié que les sujets ne possédant que la vision par les bâtonnets présentaient une courbe ayant une asymptote vers 0.2 d'acuité dans le prolongement de cette courbe.*
- *Le deuxième segment, dont les luminances sont comprises entre environ 0.1 et 40 cd/m² et les acuités situées entre 0.16 et 15 dixièmes, est caractérisé par une progression rapide de forme log-linéaire de l'acuité. On passe alors d'une adaptation intermédiaire, dite mésopique où fonctionnent cônes et bâtonnets, à une adaptation franchement photopique à partir de 10 cd/m².*
- *Le troisième segment est caractérisé par des luminances supérieures à 100 cd/m² et des acuités supérieures à 15 dixièmes, l'acuité augmente toujours mais très faiblement, pour atteindre un palier dépendant notamment du sujet et de l'optotype. Il peut atteindre 20 dixièmes et davantage pour l'acuité dite de Vernier (réf. [53]).*

Ce palier a été mis en évidence par bon nombre de chercheurs: Lythgoe (réf. [56]), Schlaer (1937), Siedentopf, Meyer et Wempe (1941). (réf. [53])

La courbe avait été modélisée par Moon et Spencer (1944) (réf. [53])

$$A(L) = A_{\infty} \frac{L}{(L^{1/3} + 0.28)^3}, \quad (\text{eq 2.1})$$

avec A_{∞} , l'acuité asymptotique atteinte pour les fortes luminances.

On voit donc que plus la luminance du fond est élevée, plus la visibilité augmente. Les éclairagistes en ont déduit que l'exploration visuelle est alors facilitée, ce qui contribue à une baisse de la fatigue visuelle. Dans les premiers temps, ces ingénieurs aménageaient l'éclairage des locaux en assimilant les diverses tâches caractérisant les métiers à des tâches de lecture ou d'écriture sur papier en admettant que ce qui changeait c'était, d'une part, l'exigence d'acuité et, d'autre part, les surfaces réfléchissant la lumière. N'oublions pas que du temps des débuts de l'éclairagisme, l'informatique n'existait bien entendu pas.

2.1.4.2. Les normes d'éclairage

Jusqu'à très récemment, le principal instrument de mesure était *le luxmètre* (voir définitions de l'éclairage et des luminances en annexe, § A-3.1), d'où la formulation des recommandations en terme d'éclairage.

Aujourd'hui et cela essentiellement depuis l'introduction des écrans, l'instrument principal est *le luminancemètre* qui permet de rendre compte de la luminosité des surfaces perçues au niveau de la tâche et dans l'ensemble du champ perçu. A noter qu'il est toujours utile de connaître le flux lumineux disponible à hauteur d'un plan de travail, en particulier lorsque le support d'exécution d'une tâche n'est pas spécifié. C'est ainsi que, sachant que la feuille de papier a un facteur de réflexion diffuse d'environ 75%, on pouvait alors déduire de l'éclairage horizontal mesuré au niveau du document papier la luminance de ce papier d'après la formule suivante:

$$L = \rho \frac{EH}{\pi} \approx 0.75 \cdot \frac{EH}{\pi} \approx \frac{1}{4}EH \quad (\text{eq 2.2})$$

La luminance du document papier devenait alors la luminance du fond (cf. figure 2.1) pour laquelle on pouvait déduire une acuité visuelle.

Les ingénieurs avaient donc, à l'époque, des raisons d'émettre des recommandations en terme de niveau d'éclairage sur la base du degré de finesse exigé par les différentes tâches que les employés devaient accomplir.

Le tableau 2.1 montre quelques exemples de recommandations officielles. Il existe par ailleurs des recommandations tenant compte de la perte d'acuité et de l'augmentation du besoin en lumière avec l'âge.

Types de métiers	Eclairage moyen de service
Agriculture (faible charge visuelle)	
Poulaillers	50
Etables, salles de traite	150
Coulloirs	30
Laiterie	300
Industrie du cuir	
Vernissage	500
Couture	1000
Comparaison des couleurs	1000
Mécanique générale	
Machines-outils et établis, soudure	300
Travail de pièces moyennes	500
Travail de petites pièces	750
Travail très délicat ou très petites pièces	1500 à 2000
Travail de bureau	
Bureaux de travaux généraux	500
Dactylographie	500
Salle des ordinateurs	500
Salles de dessin, tables	1000
Bureaux paysagers	750 à 1000

Tableau 2.1. Exemple de recommandations en terme d'éclairage moyen à maintenir. In "Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail", Association Française d'Eclairage (réf. [8])

L'utilisation de tableaux de recommandations d'éclairage a pour principal intérêt la simplicité de la formulation. En effet, il suffit de mesurer des éclairages horizontaux. Pour la conception de l'éclairage d'un local, la règle est de poser le luxmètre à une hauteur de 80 ou 85 cm selon un quadrillage déterminé par la dimension et nature du local. En cartographiant un local donné, on peut ainsi déterminer les zones dans lesquelles l'éclairage atteint ou dépasse les valeurs recommandées en fonction du type de travail à aménager. Ces consignes sont simples à utiliser pour l'ingénieur qui veut aménager non seulement l'éclairage artificiel requis, mais également assurer un maximum de pénétration de la lumière naturelle, par l'intermédiaire de la notion de *facteur de lumière du jour (FLJ)* (Réf. [3]).

Ce facteur est défini comme étant le rapport entre l'éclairage mesuré à l'intérieur du local et l'éclairage mesuré à l'extérieur dans un endroit dégagé par temps gris (les deux mesures doivent se faire au même moment). L'éclairage extérieur par temps gris est prévisible suivant l'heure, la date et aussi le lieu géographique à partir d'abaques existantes, on peut ainsi évaluer le temps pendant lequel l'éclairage à l'intérieur (par temps gris le FLJ varie extrêmement peu et de fait peut être considéré comme constant) dépasse la valeur de consigne. Les ingénieurs réalisent des cartographies en terme de FLJ ou de pourcentage dit d'autonomie en éclairage artificielle. Au cours du temps pendant lequel l'éclairage est dit suffisant, l'employé est supposé ne pas utiliser la lumière artificielle, donc il économise de l'énergie. Ces concepts correspondent à l'approche énergétique des ingénieurs.

La lecture des recommandations européennes les plus récentes (voir ci-dessous), montre bien que, avec le développement récent de l'ergonomie visuelle depuis l'apparition des écrans, ces recommandations relatives au niveaux d'éclairage sont insuffisantes et qu'elles doivent être complétées par un *indice d'éblouissement*, un *indice de rendu des couleurs* et éventuellement d'un *indice de température de couleur*. C'est ainsi que sont données également des directives très générales concernant l'ambiance lumineuse.

réf. No	Tâche ou activité	E _m	UGR _L	R _a	Remarques
	Bureaux				
	Classements, transcription	300	19	80	
	Traitement de données	500	19	80	Ecran: mesures spéciales *
	Dessin industriel	750	16	80	
	Archives	200	25	80	
	Industrie				
	Inspection des couleurs	1000	16	90	T _{CP} > 4000 K-6000 K
	Ateliers d'électronique	1500	16	80	
	Laboratoires	500	19	80	
	Préparation de matériaux	200	28	40	
	Zones de circulation				
	Escaliers	150	25	40	
	Couloirs	100	28	40	
	Soins				
	Champ opératoire	>1000 0			
	Soins divers	500	19	90	T _{CP} > 4000 K
	Surveillance de nuit	20	19	90	

Tableau 2.2 Recommandations en terme d'éclairage horizontal, d'indice d'éblouissement UGR, et d'indice de rendu de couleur R_a pour différents type de travaux.

* Pour les écrans, doit être adapté à la tâche et selon les recommandations nationales.
En Suisse, on admet que 300 lx suffisent lorsque seul l'écran est utilisé.

§ Dans les zones occupées de façon continue, l'éclairage moyen à maintenir ne doit pas être inférieur à 200 lx.

§ L'éclairage à maintenir des zones environnantes immédiates doit être en rapport avec l'éclairage de la zone de travail et il y a lieu de réaliser une distribution bien équilibrée des luminances dans le champ visuel.

§ Les éclairages moyens des zones environnantes immédiates peuvent être plus faibles que l'éclairage de la tâche mais ne doivent pas être inférieurs aux valeurs données dans le tableau présenté ci-dessous.

§ La valeur de l'éclairage peut être décalée d'un ou plusieurs échelons dans l'échelle des éclairages si les conditions visuelles diffèrent des conditions normales. Un facteur d'environ 1.5 représente la plus petite différence significative dans l'effet subjectif de l'éclairage.

20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 - 750 – 1000 – 1500 – 2000 - 3000 - 5000 lx

Extrait des normes européennes, projet définitif pr EN 12464 mars 2001

Eclairage de la tâche (lx)	Eclairage des zones environnantes immédiates (lx)
> 750	500
500	300
300	200
< 200	Eclairage de la tâche

Tableau 2.3 Recommandations en terme d'éclairage au niveau de la tâche et d'éclairage des zones environnantes.

Extrait des normes européennes, projet définitif pr EN 12464 mars 2001

2.1.4.3. Le contraste "entourage-tâche"

Cette apparente simplicité méthodologique cache toutefois un certain nombre d'inconvénients propres à rendre les recommandations inefficaces pour l'aménagement du poste de travail et en particulier celui qui comporte un écran d'ordinateur. En effet, l'écran d'ordinateur étant auto-luminescent, l'augmentation du niveau de lumière ambiante, que l'on peut caractériser par une augmentation de l'éclairement horizontal, ne contribue finalement qu'à augmenter les reflets sur l'écran, ainsi que le contraste entre l'écran et son entourage, et donc à diminuer le confort visuel. Dans ce cas, les recommandations deviennent erronées. On rencontre souvent sur le terrain le cas d'opérateurs sur écran travaillant dans des locaux sombres, fermant les stores, éteignant la lumière artificielle. On voit donc là le premier inconvénient de la méthode: elle ne tient pas compte de la distribution de luminance. En effet, Lythgoe (réf. [56]) avait montré que cette courbe "acuité-luminance", plus particulièrement sa portion asymptotique caractéristique des luminances élevées, dépendait aussi du contraste entre le fond et l'environnement (figure 2.2) : lorsque l'entourage devient plus clair que le fond (partie droite de la figure), l'acuité visuelle diminue très fortement avec le contraste "entourage-tâche". Lorsque l'entourage devient plus sombre (partie gauche de la courbe) l'acuité diminue aussi mais beaucoup moins nettement. Autrement dit, l'acuité passe par un maximum, celui-ci étant atteint lorsque l'entourage est environ deux fois plus sombre que le fond de la tâche (rapport de 0.5). Cette courbe explique bien le fait que les opérateurs sur écran ont tendance à diminuer la lumière ambiante. Par ailleurs, cette courbe permet aussi de comprendre les modifications de sensation de luminosité que produit l'écran suivant les contrastes de luminance. Pour s'en convaincre, il suffit de poser un écran face à une fenêtre qui est l'équivalent d'une surface très claire. Celui-ci apparaîtra alors sombre et il sera difficile de le lire; si, par contre, le même écran est posé face à un mur sombre, il paraîtra lumineux et nettement plus lisible. Ceci explique pourquoi les opérateurs ferment si souvent les stores.

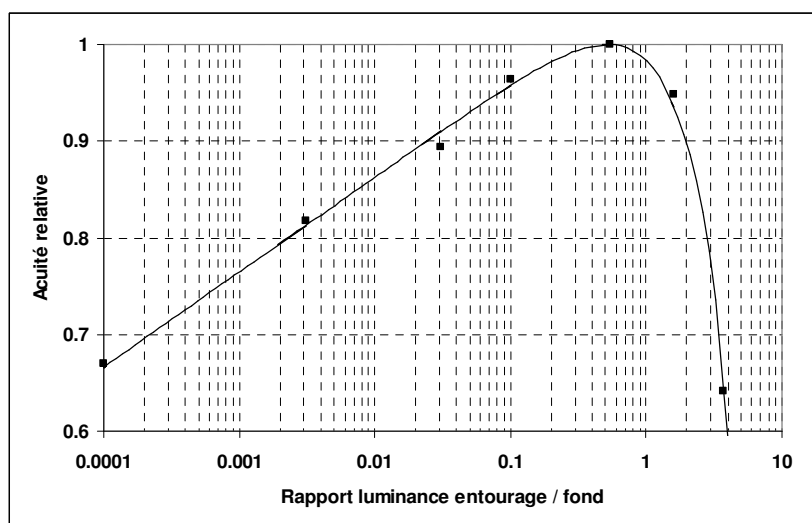


Figure 2.2 Relation entre l'acuité visuelle relative asymptotique en fonction du contraste entre le fond et l'entourage caractérisé par le rapport des luminances de l'entourage sur le fond (repris de Lythgoe, réf. [56])

On comprend donc par cet exemple que des recommandations basées uniquement sur l'éclairement horizontal sont insuffisantes.

2.1.4.4. Nécessité de disposer d'échelles d'appréciation

Ces recommandations présentent aussi l'inconvénient majeur de sous-entendre que les réponses à la luminosité sont de forme binaire, c'est-à-dire du type tout ou rien. En effet, la

question "la lumière est-elle suffisante pour mon activité" reçoit une réponse simple oui (si l'éclairage horizontal est dans la bonne fourchette), et non dans le cas contraire. Dans le cas de la réponse négative, il n'y a aucune échelle d'appréciation du degré d'insatisfaction. Ainsi, on ne fait pas de différence entre 2 situations refusées très éloignées en terme d'éclairage et 2 situations très proches dont une seule est acceptée (les éclairages étant alors très proches et de part et d'autre de l'éclairage recommandé). Il est donc important de créer des échelles d'appréciation qui permettent réellement de comparer des situations sur la base du ressenti nuancé des opérateurs. L'objectif est en effet de disposer de recommandations graduées en terme d'acceptabilité de l'insatisfaction.

2.1.4.5. *Contraste positif, contraste négatif*

Nous avons repéré dans la littérature des erreurs d'interprétation notamment sur le problème du contraste inversé (caractère clair sur fond sombre). Bien que ce type de contraste a tendance à disparaître sur les écrans, il existe des métiers pour lesquels il est encore largement répandu. Il s'agit par exemple de la CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Les concepteurs utilisent beaucoup le graphisme 3D au moyen de schémas de type "fil de fer" qui nécessitent l'emploi d'une grande diversité de couleurs devant être reconnaissables. Il apparaît que la détection de ces couleurs est plus aisée sur fond noir que sur fond blanc. Par ailleurs, quantité de situations de travail impliquent des affichages ou des conditions de visibilité avec ce type de contraste comme c'est aussi le cas sur les voies de circulation en condition nocturne.

Une erreur de modélisation, souvent reproduite dans divers ouvrages sur la vision ou l'éclairagisme, concerne, à notre avis, la relation "acuité-contraste" quand le fond est sombre. Les figures reproduites (réf. [98]) montrent le même genre de relation entre les deux types de contrastes (voir figure 2.3), avec une acuité supérieure pour le contraste positif. Dans la réalité, les deux contrastes n'ont pas du tout un effet symétrique sur l'acuité. La courbe du contraste positif est correcte: l'acuité augmente avec le contraste *jusqu'à saturation*; mais dans le cas du contraste négatif l'acuité augmente jusqu'à atteindre un maximum puis diminue quand le contraste devient trop fort. Il s'agit d'un effet d'éblouissement dû à la diffusion de la lumière du caractère quand il se trouve sur un fond très sombre. La figure 2.4 montre ce phénomène; il sera discuté plus en détail dans le paragraphe concernant les hypothèses et dans le point résultats.

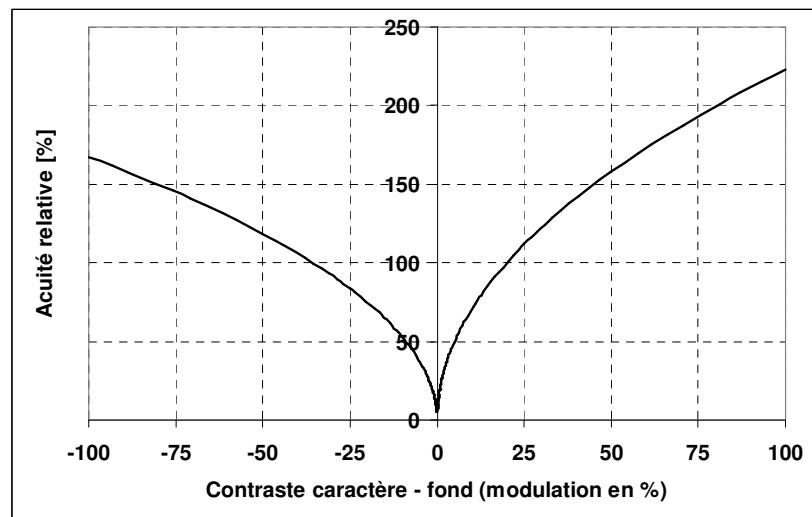


Figure 2.3

Exemple de relation acuité – contraste (réf. [98]) avec le contraste négatif et positif. Ici le contraste est défini en terme de modulation:

$$C = \frac{L_F - L_C}{L_F + L_C}$$

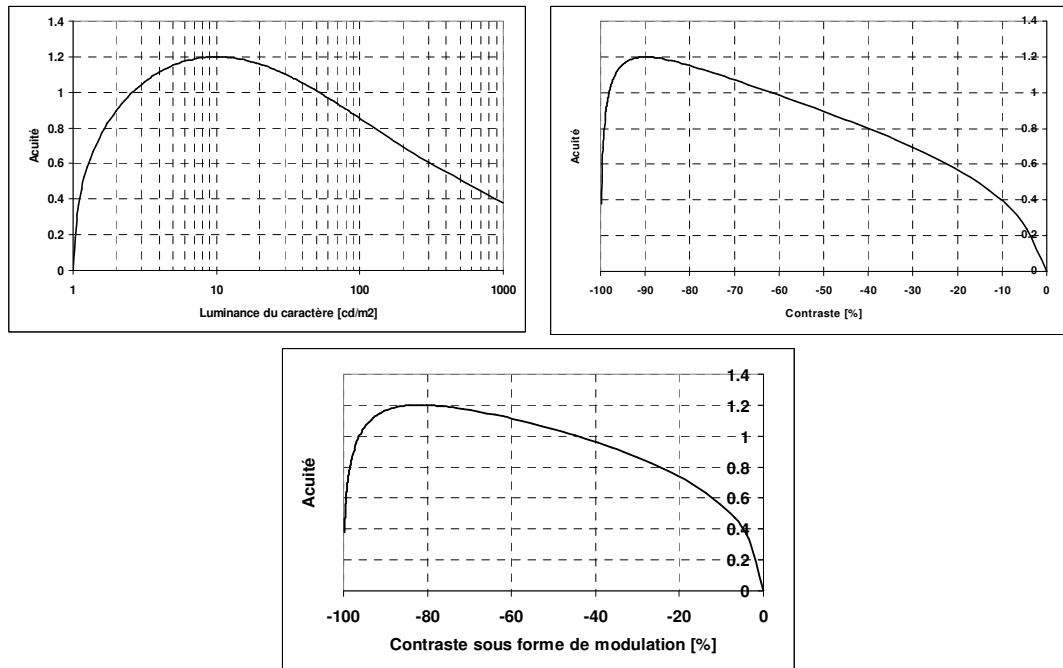


Figure 2.4 Exemple de courbes lissées "acuité-luminance" du caractère (à gauche) ou "acuité-contraste" (à droite) telles qu'on peut les établir en laboratoire (cf figure 4.75) – Il s'agit des mêmes seuils représentés de trois manières différentes. La luminance du fond (L_F) était de 1 cd/m^2 et le contraste est calculé avec la

formule suivante: $C = 100 \frac{L_C - L_F}{L_C}$ (L_C étant la luminance du caractère) ou sous

la forme de modulation (cf. figure 2.3).

Il faut relever que le contraste inversé implique des problèmes d'adaptation à la lumière liés à la dimension angulaire du fond et son rapport de contraste avec la luminance de l'environnement. C'est pour cette raison que le test C45 a été conçu avec un faible entourage lumineux de 10 cd/m^2 (Réf [62]). D'autre part, si de toute évidence, dans la majorité des cas le contraste positif est préférable au contraste négatif, il existe des cas, par exemple, même pour un travail de bureautique classique, où c'est l'inverse.

2.1.4.4. Le test ergophtamologique C45

Par opposition au test clinique d'acuité qui simule essentiellement un poste de lecture de textes imprimés dans un local bien éclairé, les tests ergophtamologiques ont été conçus pour simuler différents aspects de la sollicitation visuelle. Ces tests sont de deux types : soit ils interrogent une ou plusieurs fonctions particulièrement sollicitées comme par exemple l'aptitude à accommoder ou à converger (réf. [58]), soit ils évaluent la performance d'acuité dans des conditions qui simulent l'éblouissement où des conditions de présentation qui s'éloignent de celles, très favorables, d'un texte imprimé de qualité bien éclairé. Le test C45 relève de cette deuxième catégorie. Conçu par Meyer et col. (réf. [62]) et utilisé sur plus de 1000 sujets depuis 15 ans, ce test a permis de mettre en évidence la variabilité de réponse des opérateurs sur écran notamment en terme de besoin en lumière. Le test consiste à faire régler, par le sujet lui-même, la luminance minimale de perception d'un caractère standard en fonction de la taille de ce dernier (plus le caractère est petit, plus il faut de la lumière pour le décrypter, du moins avant qu'interviennent les effets d'éblouissement. Les conditions lumineuses sont très strictes: cadre d'entourage de 10 cd/m^2 entourant la surface de 15° de 0.1 cd/m^2 au centre de laquelle est situé un fond noir de 3° au centre duquel le caractère est présenté en contraste négatif (caractère claire sur fond sombre). Le contraste négatif est particulièrement intéressant car les sujets souffrant de défauts dioptriques y sont particulièrement sensibles. Le caractère présenté est un anneau de Landolt, soit un anneau brisé dont il faut déceler l'orientation de la brisure (cf. fig. A.5, annexe, § A-3.2.1). On diminue la taille du caractère, pour atteindre la valeur seuil d'acuité en relevant la luminance

correspondante. Le dernier point (L_m , V_m) ainsi mesuré constitue une caractéristique physiologique du sujet.

V_m est l'acuité maximale (inverse de la taille minimale) que le sujet peut obtenir dans ce test et L_m est la luminance correspondante. V_m caractérise la capacité visuelle et L_m la sensibilité à la lumière du sujet.

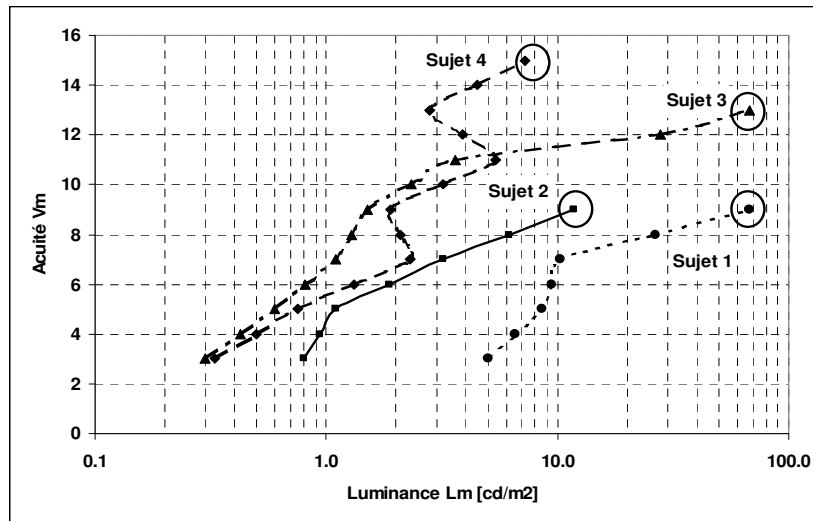


Figure 2.5 Exemple de courbes de C45 pour 4 sujets. Les cercles correspondent aux points (L_m , V_m) caractéristiques des sujets.

La figure 2.5 montre 4 sujets qui se différencient par leur acuité visuelle (faible acuité pour les sujets 1 et 2) et leur besoin en lumière (les sujets 2 et 4 sont caractérisés par leur relative sensibilité à la lumière). Les personnes âgées ont souvent une acuité faible associée à un besoin élevé en lumière, alors que des sujets plus jeunes, porteurs de défaut dioptrique, peuvent présenter des acuités faibles associées une faible utilisation de la lumière. Les sujets jeunes sans défaut dioptrique atteignent de hautes performances avec peu de lumière (réf. [73]).

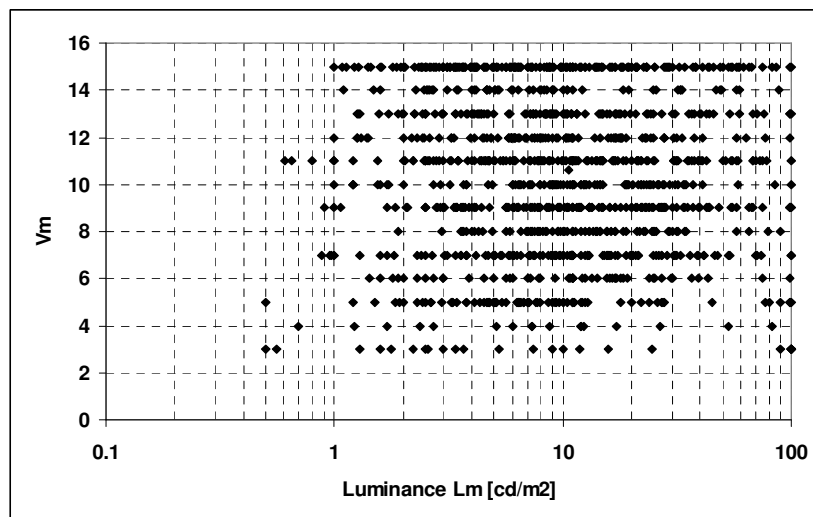


Figure 2.6 Distribution des points (L_m , V_m) pour 1212 sujets représentant la population active (données les plus récentes des expertise du LEV).

Dans la figure 2.6, la corrélation entre L_m et V_m valant 0.05 est donc non significativement différente de 0, ce qui montre qu'il n'y a pas de relation entre ces deux paramètres. Cela signifie que deux personnes ayant la même acuité dans ce test peuvent se distinguer par leur valeur L_m .

2.1.5. Critères d'éblouissement

2.1.5.1. Définitions

En traitant dans le paragraphe précédent des divers aspects de l'inconfort visuel, nous avons mentionné le type d'éblouissement que les éclairagistes anglais désignent par *Disability Glare*, et que l'on peut traduire en français par *éblouissement perturbateur*.

Ce type d'éblouissement est celui qui perturbe la vision en diminuant l'acuité visuelle, comme par exemple la perte de visibilité engendré par effet d'éblouissement des phares de voiture. Il s'agit d'un phénomène essentiellement d'ordre physiologique.

L'autre type d'éblouissement mentionné est le *Discomfort Glare*, que l'on traduit par *éblouissement d'inconfort*. Cet éblouissement correspond à une gêne subjective, n'ayant pas forcément d'effet direct sur l'acuité visuelle, mais qui, du moins, est susceptible d'accélérer la manifestation de divers signes d'asthénopie dont la fatigue visuelle. Nombreuses recherches menées par des ingénieurs éclairagistes ont eu pour objectif de traduire cet éblouissement en terme de modèle mathématique (réf. [40], [41], [42], [43], [17], [19], [20]), pour en déduire des recommandations.

A noter que l'on utilise aussi le terme *d'éblouissement direct* ou *éblouissement relatif*, celui-ci étant engendré directement par les objets à percevoir. Dans ce cas, il s'agit également d'un phénomène purement physiologique (réf. [8], [74]).

2.1.5.2. Eblouissement et champ visuel

En terme de recommandations, les physiologistes et ergonomes, dont Grandjean (réf. [36], [37]), avaient proposé des recommandations sous forme de rapports de luminance à ne pas dépasser dans le champ visuel. Il fallait que les rapports de luminance entre l'écran et son entourage proche (ergorama) ne dépassent pas la valeur de 3 (le sens du rapport n'étant pas précisé), et que les rapports entre ce même écran et son entourage lointain (panorama) ne dépassent pas 10 (ou 20 selon les auteurs). A noter que les rapports de luminance entre tâche et entourage proches ont été étudiés par Guth (réf. [40]) en terme de perte de sensibilité au contraste et de réaction des réflexes palpébraux (in Grandjean: réf [36]). Pour évaluer une situation selon ces principes, il devait alors suffire de mesurer la luminance de l'écran, la luminance maximale dans l'entourage proche ou l'ergorama et la luminance maximale dans l'entourage lointain ou panorama. Le problème est que, dans la réalité, ces deux zones sont souvent très mal définies. Ainsi, de la même manière que pour les recommandations en terme d'éclairage horizontal, on en arrive aux mêmes difficultés d'applications. En particulier, on a là aussi une réponse binaire, sans nuance. Par exemple, que devons-nous déduire d'une situation où l'un des deux rapports est excessif et pas l'autre? Par ailleurs, pour que ces recommandations soient applicables, il faudrait que soient précisés les éléments suivants :

- La taille angulaire des sources de lumière ;
- La position angulaire des ces sources lumineuses dans le champ visuel (nous savons que plus les sources lumineuses se rapprochent de l'axe de vision, plus elles sont éblouissantes) ;
- L'effet de l'éblouissement sur une population de référence définie par son profil visuel;
- Le niveau d'éclairage des yeux déterminé par l'ensemble des sources de lumière perçues. En effet, la sensibilité à l'éblouissement change en fonction du niveau global d'éclairage des yeux.

2.1.5.3. L'indice de position de Guth et l'indice UGR

Tous ces paramètres ont déjà été pris partiellement en compte par les ingénieurs (Guth, Hopkinson, Einhorn,...), qui ont élaboré un certain nombre de modèles mathématiques permettant d'évaluer l'éblouissement. Celui qui est actuellement officiellement reconnu par la CIE (réf. [8]) est l'indice UGR (Unified Glare Rating). Cet indice est défini par les équations mathématiques suivantes :

$$UGR = 8 \text{ Log} \left(\frac{1}{4L_f} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{P_i^2} \right) \quad (\text{eq 2.3})$$

Avec: L_f luminance du fond définie comme la luminance moyenne du champ visuel en retirant les sources lumineuses qui s'y trouvent. $L_f = \frac{E_{\text{ind}}}{\pi}$, avec E_{ind} = éclairage indirect ;

L_i luminance moyenne de la $i^{\text{ème}}$ source lumineuse ;

N nombre de sources lumineuses présentes dans le champ visuel ;

ω_i angle solide sous-tendu par les parties lumineuses de chaque luminaire et l'œil de l'observateur ;

P_i indice de position de Guth de la $i^{\text{ème}}$ source lumineuse (prise au centre de la source) : cet indice représente l'effet sur l'éblouissement de l'éloignement de la source lumineuse par rapport à l'axe de vision.

$$\text{Log}(P(\sigma, \tau)) = \left[35.2 - 0.31889\tau - 1.22 \exp\left(-\frac{2\tau}{9}\right) \right] 10^{-3} \sigma + \left[21 + 0.26667\tau - 0.002963\tau^2 \right] 10^{-5} \sigma^2 \quad (\text{eq 2.4})$$

q 2.4)

où (σ, τ) sont les angles de repérage des points dans le champ visuel.

L'indice UGR ainsi calculé devrait permettre une évaluation nuancée de l'éblouissement. Il varie essentiellement entre 10 (pas d'éblouissement) et 30 (fort éblouissement). Il peut aussi varier en dehors de ces fourchettes.

Cependant, si les équations 2.3 et 2.4 tiennent compte de la taille (l'angle solide ω_i) et de l'emplacement des sources (par l'intermédiaire de l'indice P_i) et aussi du niveau d'éclairage des yeux (par l'intermédiaire de L_f), elles ne tiennent pas compte, sous cette forme, du profil visuel des sujets.

L'indice UGR, créé surtout pour rendre compte de l'effet de sources d'éblouissement ponctuelles, en l'occurrence les luminaires, possède aussi l'inconvénient de mal définir ce qui se passe avec des sources lumineuses de grandes dimensions apparentes et peu homogènes (par exemple des fenêtres). On en déduit que si l'indice est certainement adapté à la lumière artificielle, il l'est beaucoup moins à la lumière naturelle. Sachant que les ingénieurs du bâtiment et architectes actuels cherchent à utiliser au maximum la lumière naturelle, notamment à des fins d'économie d'énergie, mais aussi et surtout parce qu'il est reconnu que tout individu a besoin de la lumière naturelle, il devient judicieux d'évaluer l'éblouissement dû à ce type de lumière. Il faut noter que pour beaucoup de tâches industrielles et surtout pour l'écran, le regard est relevé (réf. [74]). A noter que cet effet d'éblouissement ne se manifeste pas seulement par temps ensoleillé en absence de stores, mais également par ciel dégagé ou temps gris clair.

2.1.6. Couleur, température de couleur et courbes de Kruthoff

Nous avons déjà mentionné plus haut le rôle joué par la qualité spectrale des sources de lumière dont les effets sont physiques, physiologiques et psychologiques.

Au niveau de la conception d'un environnement visuel, il faut considérer en tout premier l'effet physique des relations entre composition spectrale des sources et propriété des surfaces réfléchissantes. En effet, tout matériau réfléchissant est caractérisé par son facteur de réflexion. En particulier, l'utilisation de certaines couleurs saturées, caractérisées par un faible facteur de réflexion, induit une perte globale de lumière dans le local ainsi que des contrastes élevés avec les fenêtres.

La qualité spectrale des sources de lumière intervient tout d'abord dans le rendu des couleurs qualifié par l'indice Ra qui comporte une échelle de 100 unités. C'est ainsi que l'on considère comme suffisant un indice de 80 et comme bon un indice de 90 (voir tableau 2.2). Indépendamment de cette exigence en rapport avec le traitement de l'information requis par la tâche, et qui relève de la psychologie cognitive, la couleur joue un rôle physiologique et un rôle psychologique qui touchent au confort visuel.

La couleur perçue comporte d'abord des aspects physiologiques (réf [74"], [9], [93]). Les couleurs saturées induisent aussi des effets d'adaptation chromatique et accentuent certains défauts de réfraction qui obligent l'œil à fournir un effort d'accommodation plus élevé. Enfin, il faut penser aux sujets souffrant de dyschromatopsie souvent sans le savoir, le daltonisme ne présentant qu'un cas extrême.

En ce qui concerne les effets psychologiques, on touche, d'une part, aux goûts des individus mais aussi, d'autre part, à certains effets susceptibles d'interférer avec le confort et qui ont fait l'objet de nombreuses observations et résultats expérimentaux mentionnés par des éclairagistes (réf. [16], [49]) ou des psychologues (réf. [31]). Ainsi, il est reconnu que les couleurs de type chaud (rouge, jaune, beige) donnent souvent l'impression de rapetisser le local et de réchauffer l'atmosphère, contrairement aux couleurs froides (bleu, vert). De même, les rouges et les jaunes auraient des propriétés stimulantes alors que les verts et les bleus seraient froids et reposants. Les couleurs claires donneraient aux objets un aspect de légèreté au contraire des couleurs foncées. Ces effets sont évidemment à prendre en compte mais en s'assurant d'abord que les critères psychophysiques soient remplis.

Un autre aspect directement lié à la composition spectrale des sources de lumière et des surfaces blanches ou blanchâtre (blanc cassé) qui la réfléchissent est leur température de couleur proximale (TPC) qui peut influencer le sentiment global de confort en induisant la sensation de froideur (on dit une couleur "froide" ou de chaleur (couleur ou coloris "chaud"). Il faut cependant réaliser que le meilleur rendu des couleurs (Ra de 90 au moins) est nécessairement associé à blanc "neutre" qui cependant paraît froid, voire bleuté par comparaison avec un blanc chaud légèrement déséquilibré en direction des rouges et avec un moins bon rendu des couleurs (Ra voisin de 80). La sensation de neutralité, de chaud ou de froid est également modifiée par le niveau d'éclairage d'un local.

En 1941 Kruithoff (réf. [49]) en équipant un local des différents tubes fluorescents récemment développés par Philips avait mis en évidence que cette sensation de lumière "froide" ou "chaude" ne dépendait pas que de la température de couleur mais également du niveau d'éclairage. Kruithoff a pu démontrer l'existence de deux courbes (figure 2.7) entre lesquelles les gens jugeaient l'ambiance comme neutre et au-delà desquelles ils jugeaient l'ambiance comme gênante, car ressentie comme trop froide ou trop chaude. D'après la figure 2.7, on observe des cas qui peuvent sembler paradoxaux. En effet, on peut très bien avoir une ambiance dont la température de couleur correspond à une lampe dite chaude (ex: lampe à incandescence de température 2700 °K) et ressentir cette ambiance comme trop froide. C'est le cas quand l'éclairage est vraiment très bas. On voit aussi que lorsque l'on dispose de ce type de lampe chaude, la fourchette d'éclairage assurant le sentiment de neutralité devient très étroite. Par exemple, pour une lampe de 2500 °K, l'éclairage horizontal devrait se situer entre environ 50 et 100 lx. On observe aussi que, avec l'augmentation de la température de couleur, la fourchette des éclairages qui garantissent la neutralité s'agrandit, en même temps que l'éclairage minimum requis .

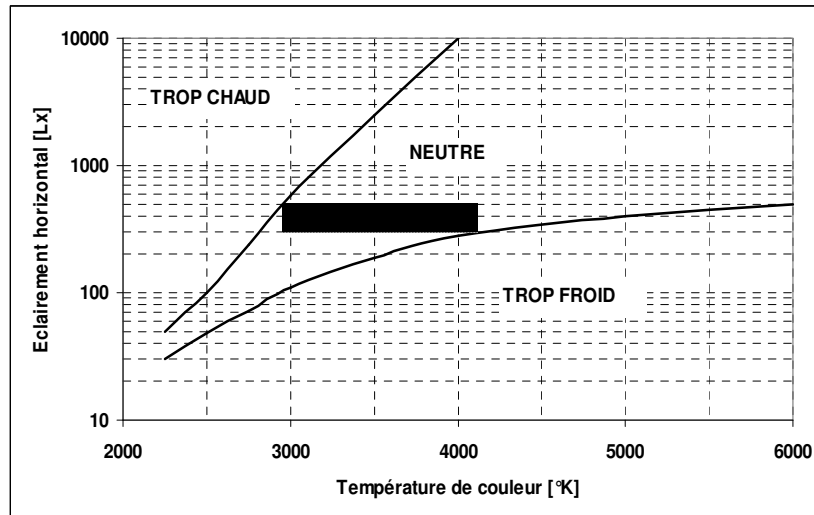


Figure 2.7 Courbes de Kruijthoff. La zone en grisé correspond au confort pour le travail sur écran avec une fourchette d'éclairéement recommandé entre 300 et 500 lx.

Nous avons mis en équation ces deux courbes, afin de pouvoir prédire mathématiquement la fourchette d'éclairéement pouvant être associée à la température de couleur mesurée.

$$E_{\min}(T_C) \approx \exp\left(7.193 - \frac{1.095 \cdot 10^7}{T_C^2} - \frac{3.807 \cdot 10^3}{T_C}\right) \quad (\text{eq 2.5})$$

$$E_{\max}(T_C) \approx 0.0512 \exp(0.00307 \cdot T_C) \quad (\text{eq 2.6})$$

$E_{\min}(T_C)$ correspond à la courbe du bas de la figure 2.7, celle séparant la zone "neutre" à la zone "trop froid".

$E_{\max}(T_C)$ correspond à la courbe du haut de la figure 2.7, celle séparant la zone "neutre" à la zone "trop chaud".

Nous avons également élaboré un indice (IFC: Indice de Froideur / Chaleur) permettant de savoir si la situation caractérisée par un éclairéement EH et une température de couleur donnés pouvait être considérée comme froide, chaude ou neutre.

$$\text{IFC}(EH, T_C) = \frac{\text{Ln}\left(\frac{EH}{\sqrt{E_{\min}(T_C) \cdot E_{\max}(T_C)}}}\right)}{\text{Ln}\left(\sqrt{\frac{E_{\max}(T_C)}{E_{\min}(T_C)}}}\right)} \quad (\text{eq 2.7})$$

Cet indice vaut 1 si $EH = E_{\max}$ et vaut -1 si $EH = E_{\min}$. Ainsi des valeurs négatives indiquent une froideur de l'ambiance et des valeurs positives indiquent une chaleur de l'ambiance. Les valeurs intermédiaires de l'indice IFC correspondant à des jugements nuancés situés entre ces deux extrêmes. La formule fait apparaître un logarithme qui rend compte de la loi logarithmique (loi Weber-Fechner) de la perception de luminosité. La figure 2.8 montre comment cet indice varie en fonction de la température de couleur et de l'éclairéement.

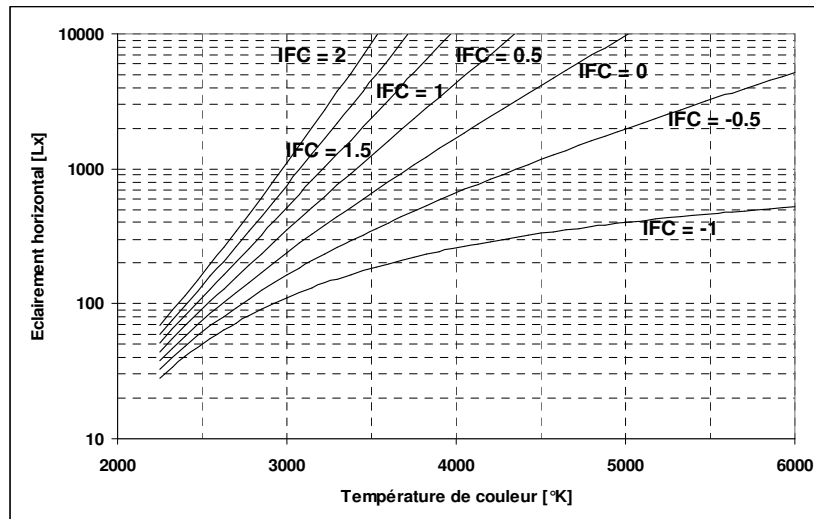


Figure 2.8 Courbes de l'indice IFC de prédiction des sentiments respectifs d'ambiance lumineuse "chaude", "froide" ou "neutre" en fonction de l'éclairage horizontal et de la température de couleur K.

Cet indice permet de décrire de façon nuancée le degré de sensation de froideur, de chaleur ou de neutralité. Toutefois, l'expérience qu'avait réalisée Kruithoff ne faisait appel qu'à une seule source de lumière, de surcroît artificielle. La question que nous nous sommes posée alors est la suivante: que se passe-t-il quand plusieurs sources de lumières de température de couleur diverses se côtoient et, surtout, que se passe-t-il avec la lumière naturelle, les courbes de Kruithoff sont-elles encore valables? En effet, la lumière naturelle présente des aspects spécifiques : d'une part son spectre est continu ; d'autre part, par temps gris la lumière paraît paradoxalement plus froide (env. 5000 °K) que la lumière du soleil direct réfléchi sur un mur blanc (env. 8000 – 9000 °K). Comment les sujets perçoivent-ils ces deux types de lumière ? la lumière du soleil est généralement préférée à la lumière "grise". Dans ce cas, on peut mentionner un effet d'association psychologique et aussi une meilleure diffusion générale de la lumière naturelle avec de larges fenêtres. Il faut également tenir compte de la dimension et de la position des fenêtres. Autre question: faut-il mesurer les éclairages au niveau des yeux ou au niveau de la table, ou encore tenir compte des deux valeurs ? Enfin, en condition de lumière naturelle surtout, on peut penser qu'il existe aussi d'autres paramètres qui peuvent entrer en ligne de compte tels que la météo, la température de l'air, et l'aspect des surfaces des parois brillantes ou mates, claires ou sombres, etc...

2.1.7. Résumé

Nous avons vu dans ce paragraphe quelques exemples de modèles et de recommandations en éclairagisme. Il existe bien d'autres types de recommandations notamment sur l'inhomogénéité de la distribution d'éclairage dans le local, la qualité des écrans de visualisations. Le confort visuel n'est pas entièrement exprimé par l'éblouissement, la performance visuelle et l'ambiance colorée, mais ces effets en représentent une partie importante des paramètres principaux. Les ingénieurs éclairagistes ont été les premiers à étudier le confort visuel pour pouvoir aménager les systèmes d'éclairage "performants". A l'heure actuelle, la tendance est de faire pénétrer le plus possible la lumière naturelle dans les locaux dans un but d'économie d'énergie. Néanmoins, les critères de confort visuels sont encore assez mal définis et mal adaptés aux situations rencontrées sur le terrain. Ceci est à considérer, avec les problèmes d'intensité de l'exploration visuelle, comme les principales causes des signes d'asthénopie visuelle, de fatigue visuelle et de réaction de gêne mis en évidence par de très nombreuses analyses ergonomiques et qui représentent une situation défavorable pour la santé et le rendement au travail. Ce constat nous a motivé pour développer de nouveaux indicateurs de confort visuel qui soient mieux adaptés à la sollicitation réelle des travailleurs affectés à des tâches à forte charge visuelle. En effet les indicateurs devraient mieux tenir compte d'une part des principaux paramètres

photométriques déterminant les réponses physiologiques et d'autre part, de la variabilité qui caractérise le profil visuel de la population exposée.

2.2. Hypothèses

2.2.1. Préambule

Dans notre recherche, nous parlons essentiellement d'inconfort visuel, alors qu'il faudrait parler de confort visuel. En effet, l'ergonome s'intéresse aux facteurs de gêne ou de fatigue plutôt qu'aux facteurs de "bien-être" pour deux raisons principales. D'abord, nous savons tous que le confort, qui correspond à une absence de sensations spécifiques, est difficile à graduer. D'autre part, en raison de la variabilité et de l'aspect plurifactoriel des sources de gêne et de nuisance, on n'obtiendra jamais, dans un collectif de sujets, une situation qui les satisferait tous. Ainsi, on pourra au mieux estimer le risque d'inconfort relatif lié à certains facteurs non optimisés pour un certain nombre de sujet, en général entre 25 et 30 %. C'est par exemple ce qui ressort dans l'étude du confort thermique (cité par Grandjean (réf. [36])). Enfin, dû aux phénomènes d'accoutumance et d'adaptation transitoire, certains effets ne se manifestent qu'à terme. Il s'agit néanmoins pour l'ergonome de chercher à éliminer un maximum de nuisances.

2.2.2. Modèle J-Index et indice PIV

Nous avons développé ce modèle à partir de données provenant de la littérature et de nos propres hypothèses d'un effet d'inconfort produit par une perte d'acuité. La base étant la perte d'acuité en contraste positif dans une situation donnée, par rapport à l'acuité maximale engendrée par une situation optimale.

$$J = \frac{A_{\max} - A(\text{conditions})}{A_{\max}} \quad (\text{eq 2.8})$$

"A(conditions)" est l'acuité réelle du sujet dans des conditions lumineuses fixées. L'indice J varie entre 0 (quand $A = A_{\max}$, soit une visibilité optimale) et 1 (quand $A = 0$, soit aucune visibilité).

L'acuité dépend, d'une part, du profil visuel du sujet et, d'autre part, de variables photométriques caractérisant ces conditions lumineuses. Le modèle est décrit par l'équation suivante:

$$A = A_{\max} R_1(C_1) R_2(C_2) R_3(E_p) \quad (\text{eq 2.9})$$

On remarque qu'en introduisant l'équation 2.9 dans l'équation 2.8, le terme A_{\max} disparaît:

$$J = 1 - R_1(C_1) \cdot R_2(C_2) \cdot R_3(E_p) \quad (\text{eq 2.10})$$

Cette équation exprime que l'acuité est reliée à trois paramètres photométriques fondamentaux du champ visuel, à savoir : C_1 , le contraste de luminosité entre le caractère et le fond de la tâche; C_2 , le contraste de luminosité entre le fond de la tâche et les surfaces avoisinantes (entourage) et E_p , l'éclairement pupillaire (celui reçu par les yeux). Les facteurs R_i sont assimilables à des acuités relatives; ils varient donc entre 0 et 1 de telle manière que si tous les trois facteurs prennent la valeur maximum 1, l'acuité résultante sera A_{\max} , soit la situation optimale.

$R_1(C_1)$ représente l'influence du contraste de luminosité entre le caractère et le fond de l'écran sur lequel il se détache. Le contraste est défini en contraste positif (caractère sombre sur fond clair) par la formule suivante:

$$C_1 = \frac{L_F - L_C}{L_F}, \quad (\text{eq 2.11})$$

avec L_F , la luminance du fond et L_C , la luminance du caractère.

Lors de l'élaboration de ce modèle, nous avons émis l'hypothèse que l'influence du contraste était donnée par la formule suivante:

$$R_1(C_1) = C_1^n \quad (\text{eq 2.12})$$

n est une constante dont la valeur serait proche de 0.5.

Cette équation correspond assez bien avec les courbes que l'on peut trouver dans la littérature (figure 2.9).

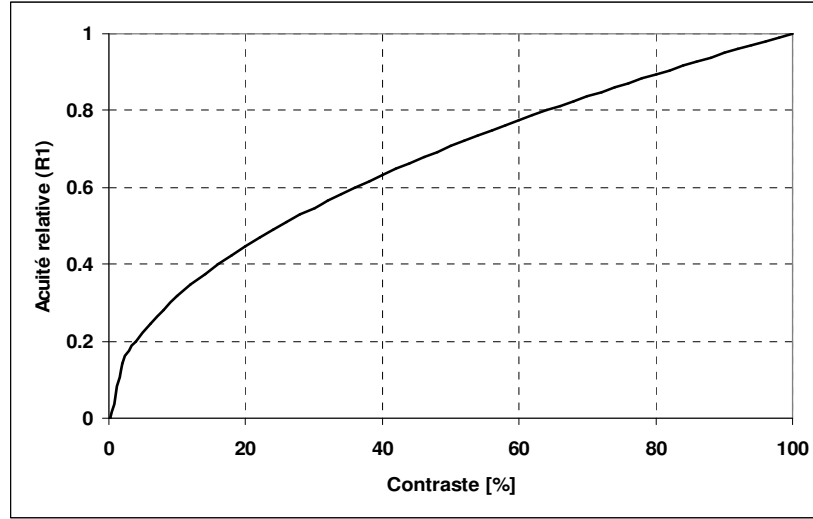


Figure 2.9 Variation de l'acuité relative en fonction du contraste.

$R_2(C_2)$ rend compte de l'influence sur l'acuité du contraste de luminosité entre le fond de l'écran et les surfaces avoisinantes. C_2 est défini comme le rapport entre les luminances des surfaces avoisinantes (luminance d'entourage: L_E) et celle du fond de l'écran (L_F):

$$C_2 = \frac{L_E}{L_F} \quad (\text{eq 2.13})$$

Cette influence a été étudiée par Lythgoe (réf [56]) et la courbe qu'il a obtenue est représentée à la figure 2.2. Nous avons déterminé l'équation mathématique qui représente au mieux cette courbe:

$$R_2(C_2) = \max \begin{cases} 0.098C_2 + 1.059 - \exp(3.137C_2 - 2.580) \\ -0.454C_2 + 1.036 - \exp(-5.179C_2 - 2.933) \end{cases} \quad (\text{eq 2.14})$$

Il faut définir la notion de *luminance d'entourage*, car, pour son expérience, Lythgoe avait mis en place des surfaces simples et homogènes autour du test. Dans notre modèle, nous avons admis que cette luminance est celle que l'on obtient par une moyenne pondérée de la distribution de luminance autour de l'écran. La pondération est donnée par l'inverse de l'index de position de Guth ($P(\sigma, \tau)$) (voir équation 2.4). Enfin, le poids des luminances augmente quand on se rapproche de l'axe de vision. L'équation 2.15 donne la formulation mathématique de L_E .

$$L_E = \frac{\iint_{\text{ent}} L(\sigma, \tau) \frac{1}{P(\sigma, \tau)} d\omega}{\iint_{\text{ent}} \frac{1}{P(\sigma, \tau)} d\omega} \quad (\text{eq 2.15})$$

$R_3(E_P)$ se rapporte à l'influence sur l'acuité de l'éclairage pupillaire. L'équation 2.16 exprime cette influence:

$$R_3(E_P) = 4 \frac{E_P^{0.35} E_0^{0.35}}{(E_P^{0.35} + E_0^{0.35})^2} \quad (\text{eq 2.16})$$

E_0 est l'éclairage physiologique nécessaire à un sujet donné pour l'obtention d'une acuité maximale.

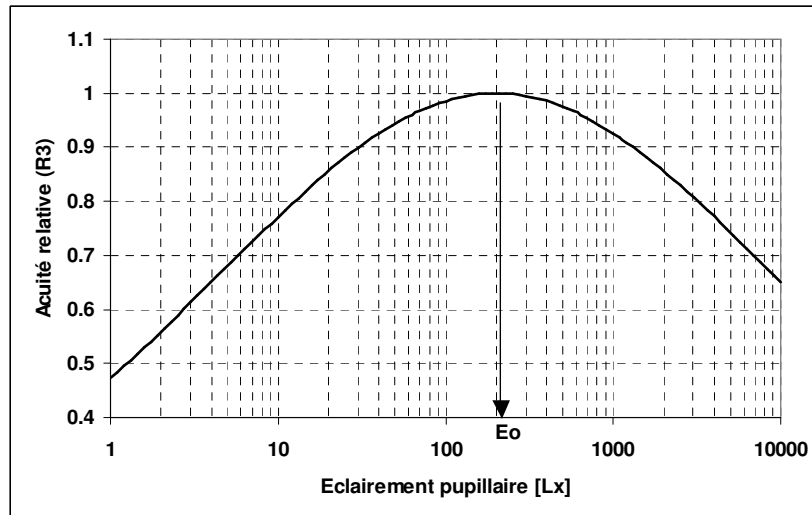


Figure 2.10 Variation de l'acuité relative en fonction de l'éclairage pupillaire.

Cette fonction est caractérisée par un maximum en E_0 , au delà duquel l'acuité diminue. Cette diminution correspond à l'hypothèse qu'avec la diminution réflexe du diamètre pupillaire en fonction de l'éclairage, on atteint une valeur limite (se stabilisant autour de 2mm suivant les individus: voir figure 2.11) au-delà de laquelle toute augmentation subséquente de l'éclairage augmente la diffusion et ainsi diminue l'acuité. Un modèle mathématique reliant le diamètre pupillaire à la luminance a été suggéré par Crawford (réf. [53]).

$$d \approx 5 - 3 \operatorname{Tanh}(0.4 \operatorname{Log}_{10}(L)) = 5 - 3 \left[\frac{L^{0.35} - 1}{L^{0.35} + 1} \right] \quad (\text{eq 2.17})$$

On généralise cette formule en introduisant l'éclairage pupillaire:

$$d \approx 5 - 3 \left[\frac{E_p^{0.35} - E_0^{0.35}}{E_p^{0.35} + E_0^{0.35}} \right] \quad (\text{eq 2.18})$$

En fait l'équation 2.16 s'apparente au type de modèle (cf. eq 2.27) que l'on a trouvé en tenant compte de la fonction de modulation de transfert (cf. §2.2.3), excepté le fait que l'on a pris l'éclairage pupillaire au lieu de la luminance de la tâche.

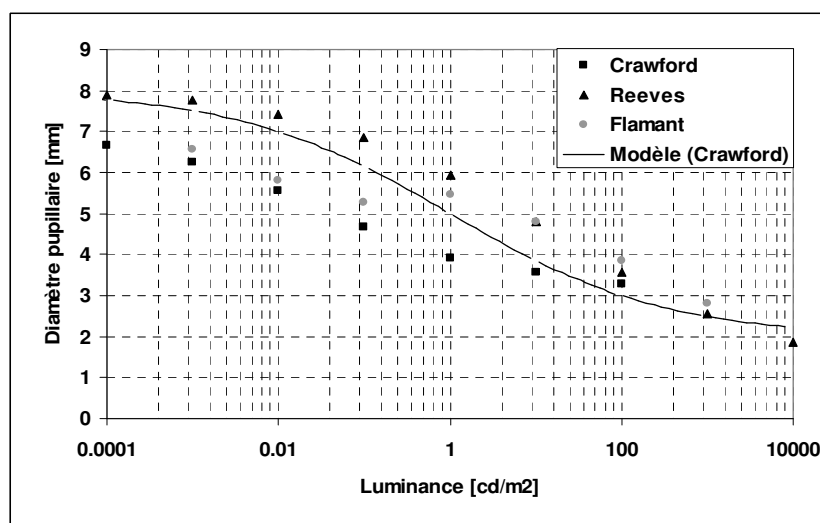


Figure 2.11 Variation du diamètre pupillaire en fonction de la luminance d'adaptation provenant de grandes surfaces dans le champ visuel. Données provenant de Crawford, Reeves et Flamant avec un modèle mathématique suggéré par Crawford (réf. [53]).

Dans ce modèle, les deux variables A_{max} et E_0 peuvent être considérées comme physiologiques en ce sens qu'elles ne sont fonction que de l'individu. Le test du C45 (cf. § 2.1.4.4 et figures 2.1) nous fournit une courbe acuité - luminance du caractère dont on déduit 4 variables physiologiques :

- L_M : luminance du caractère nécessaire pour que le sujet obtienne son acuité maximale dans les conditions du test ;
- V_M : acuité maximale du sujet ;
- V_1 : acuité du sujet si la luminance du caractère était de 1 cd/m^2 ;
- P : pente de la courbe acuité – log de la luminance ;

P et V_1 sont deux paramètres qui s'estiment par l'intermédiaire d'une régression linéaire, car la courbe a une équation de la forme :

$$\text{Acuité} = p \ln(L_C) + V_1 \quad (\text{eq 2.19})$$

Nous avons émis l'hypothèse que A_{max} était proportionnel à V_M et que E_0 était proportionnel à L_M .

Indice PIV

Cet indice, PIV signifiant **P**robabilité d'**I**nsatisfaction par manque de **V**isibilité, correspond à la probabilité, selon une population de référence, qu'un certain nombre d'individus n'atteindront pas le minimum d'acuité visuelle requis dans une situation lumineuse fixée. Cette probabilité peut être assimilée à un pourcentage de travailleurs insatisfaits à cause du manque de visibilité. Le test C45, appliqué sur plus d'un millier d'individus (1211) représentant la population active, a permis de déterminer des distributions statistiques du couple L_M et V_M (voir figures 2.3 et 2.4). Nous pouvons alors en déduire la distribution statistique des acuités obtenues dans situation donnée et ainsi calculer le pourcentage d'individus possédant une acuité inférieure à celle requise.

2.2.3. Modèle de l'acuité utilisant la fonction de transfert de modulation

Pour rendre compte de l'influence de l'acuité visuelle qui intervient dans la définition de l'indice J de visibilité, nous avons dû procéder à l'étude de la courbe *acuité – luminance du caractère* et sa signification en terme d'une fonction de transfert de modulation. Du point de

vue théorique, nous l'avons étudiée pour une luminance de fond donnée, puis nous l'avons comparée avec des données mesurées en situation expérimentale.

Le point de départ de cette étude a été celle de Guirao et Artal (réf. [39]) se rapportant à la transformation de l'image à travers le passage de la pupille et de l'intérieur de l'œil. L'œil n'étant pas un transmetteur parfait de l'image, cette dernière subit une déformation sous forme de flou. C'est ce flou qui limite, au niveau rétinien, notre acuité visuelle. L'hypothèse principale est que le contraste perçu déterminant l'acuité est le contraste correspondant au signal retransmis par la rétine (noté CS). Cette hypothèse revient à dire que si $CS < Co$ (contraste seuil) le caractère n'est pas visible, et le devient dans le cas contraire.

Par l'intermédiaire de l'analyse de Fourier, on peut évaluer mathématiquement l'effet de ce flou sur l'image. Il s'agit de la fonction de transfert (appelée MTF voir annexe). Nous avons établi la représentation mathématique des courbes expérimentales présentées dans l'article mentionné (réf. [39]).

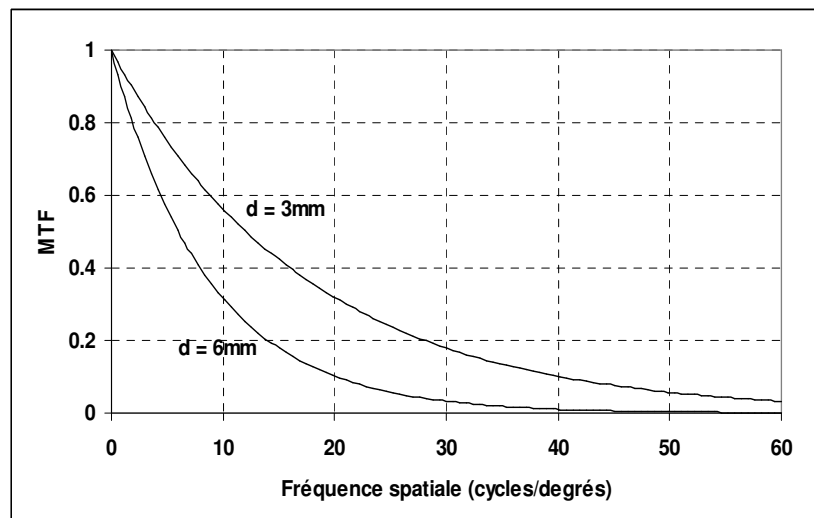


Figure 2.12 Courbe typique des MTF tirées de l'article. Ces 2 courbes correspondent à deux diamètres de pupille différents, respectivement de 3 et 6 mm.

Nous avons trouvé un modèle très simple pour ces courbes:

$$MTF = \exp(-\theta v) \quad (\text{eq 2.20})$$

v étant la fréquence spatiale et θ un paramètre dont la dimension est un angle dépendant du diamètre de la pupille et aussi de la transparence des milieux, comme c'est le cas par effet de l'âge.

Connaissant la MTF, on peut alors calculer la distribution de luminances résultant du passage au travers de la pupille.

$$L_R(\sigma, \tau) = \iint_{\Omega} IT(\sigma - \sigma', \tau - \tau') L(\sigma', \tau') d\sigma' d\tau' \quad (\text{eq 2.21})$$

Avec:

- $L(\sigma, \tau)$ = distribution de luminance avant la transformation
- $L_R(\sigma, \tau)$ = distribution de luminance après la transformation
- $IT(\sigma, \tau)$ = fonction déduite de la MTF = transformée de Fourier inverse de la MTF
- Ω = champ visuel.

$$IT(\sigma, \tau) = \frac{\theta^2}{\pi^2 (\theta^2 + \sigma^2) (\theta^2 + \tau^2)} \quad (\text{eq 2.22})$$

Nos tests visuels (cf. § 2.1.4.4) sont basés sur la reconnaissance d'un caractère nommé "crochet de Snellen" (cf. § A-3.2.1).

Les équations 2.21 et 2.22 sont décrites dans l'annexe (cf. §A-2).

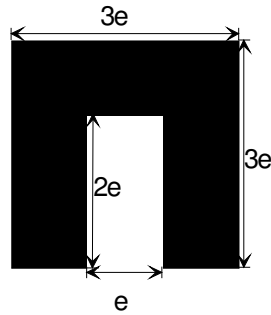
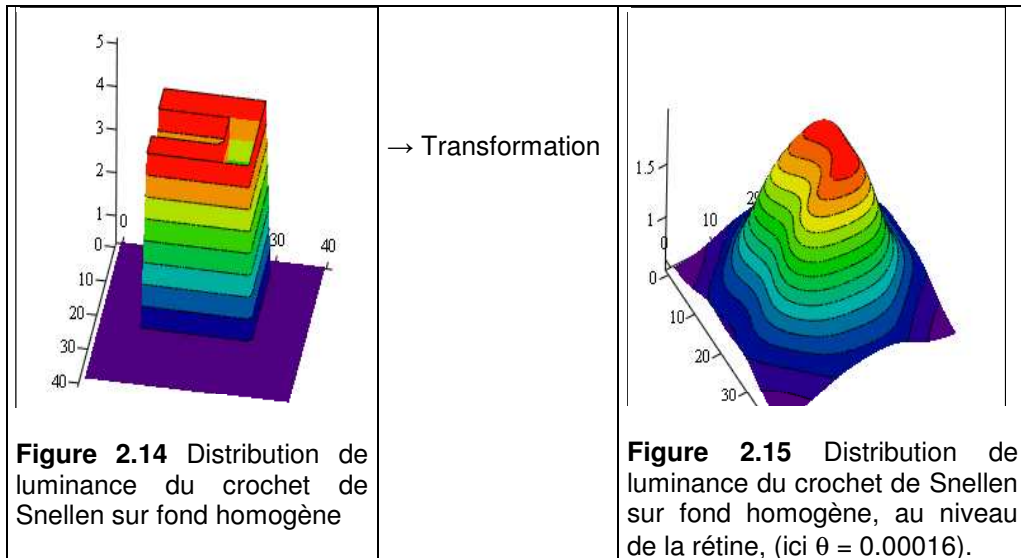


Figure 2.13 Crochet de Snellen, soit l'optotype utilisé lors de l'expérience avec e = épaisseur de la césure. Le sujet doit reconnaître l'orientation de ce test. L'acuité est définie comme l'inverse de e , cette distance étant mesurée en minute d'angle.

La situation de départ est constituée par un fond parfaitement homogène de luminance L_F au milieu duquel se détache un caractère de luminance L_C . On applique l'intégrale à cette distribution de luminance pour déterminer la distribution transformée au niveau de la rétine.



La figure 2.15 montre bien que le crochet devient beaucoup plus flou, donc moins reconnaissable après le passage de la pupille et des milieux transparents (par là-même, on peut réaliser que le traitement "nerveux" de ces images corrige jusqu'à une certaine limite la sensation de contraste et de netteté).

Au niveau de la rétine, cette distribution de luminance se transforme en signal électrique qui va être conduit via le nerf optique au cerveau. Hecht (réf [53]) avait étudié la réaction photochimique qui régit cette transformation. On en a déduit la relation suivante :

$$S(L) = \mu \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{L} + \sqrt{L_0}} \quad (\text{eq 2.23})$$

$S(L)$ étant le signal obtenu pour une luminance incidente L , L_0 étant un paramètre à déterminer.

Dans le cas du crochet de Snellen, nous avons étudié au niveau du caractère même le contraste de signal $CS = S(L_{\max}) - S(L_{\min})$, en fonction de la luminance du caractère et de sa taille (définie en terme d'acuité), la luminance du fond étant fixée à 25 cd/m^2 .

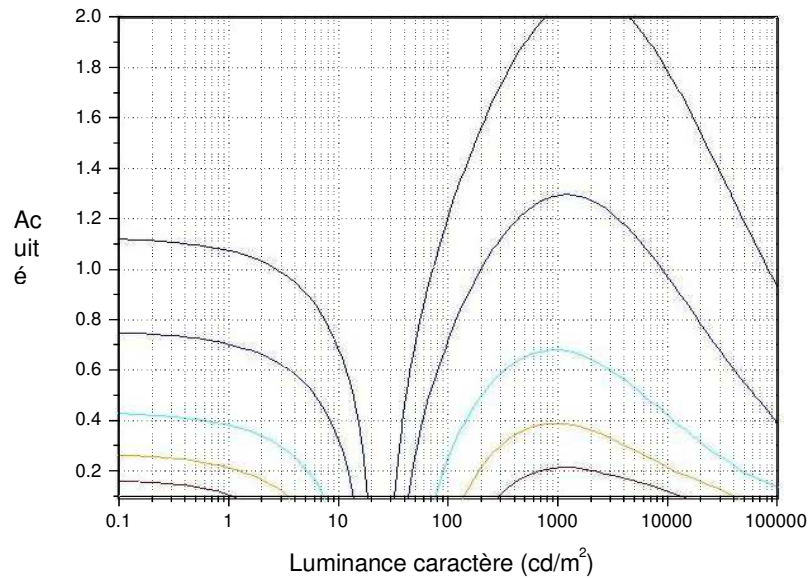


Figure 2.16 Courbes d'isovaleurs de contraste de signal avec une luminance du fond de 25 cd/m^2 . Quand la luminance du caractère est inférieure (partie gauche de la courbe, $L_C < 25 \text{ cd/m}^2$) à celle du fond on dit que le contraste est positif et négatif dans le cas contraire (partie droite de la courbe, $L_C > 25 \text{ cd/m}^2$).

L'hypothèse sur l'acuité émise au début de ce paragraphe stipule que la limite de visibilité du caractère correspond à une valeur de $CS = C_0$. La figure 2.16 montre l'ensemble des courbes pour lesquelles CS est constant (iso valeurs), cela signifie que l'une d'entre elles correspond à la courbe réelle acuité – luminance du caractère. On voit par ailleurs qu'on retrouve, pour le contraste positif (partie gauche de la figure 2.16), le même type de courbe mentionné dans la littérature (voir partie droite figure 2.3). Quant au contraste négatif, on retrouve le phénomène déjà explicité dans le paragraphe 2.2.1, à savoir: augmentation d'acuité jusqu'à un maximum puis chute pour les fortes luminances, ce que l'on peut comparer avec la courbe de la figure 2.4 et à la courbe expérimentale de la figure 4.75.

Pour le contraste positif (courbes visibles sur la partie gauche de la figure 2.16) l'acuité est liée à la luminance du caractère selon une équation du type suivant:

$$A(L_C) = a_0 \ln(L_F - L_C) + a_1 \quad (\text{eq 2.24})$$

L_F étant la luminance du fond.

Si on exprime le contraste de la manière suivante:

$$C = \frac{L_F - L_C}{L_F} \quad (\text{eq 2.25})$$

En introduisant C_0 le contraste correspondant à une acuité nulle et A_M l'acuité maximale donnée pour un contraste maximum (i.e. $C=1$), on trouve alors une équation pour l'acuité de la forme suivante:

$$A = A_M \left[\frac{\ln(C_0) - \ln(C)}{\ln(C_0)} \right], \text{ ou } \ln(C) = \ln(C_0) \left(1 - \frac{A}{A_M} \right) \quad (\text{eq 2.26})$$

Cette équation correspond en fait à une relation linéaire entre l'acuité et le logarithme du contraste, soit un type de relation que l'on retrouve chez W. Adrian (réf. [1]).

Pour le contraste négatif, la courbe obtenue ressemble à celle qui se trouve dans la figure 2.4. L'équation mathématique représentant ce type de courbe est la suivante:

$$A = 4 A_M \frac{(L_C - L_0)^\beta (L_m - L_0)^\beta}{((L_C - L_0)^\beta + (L_m - L_0)^\beta)^2} \quad (\text{eq 2.27})$$

A_M étant l'acuité maximale que l'on trouve pour une luminance de caractère optimale L_m , et L_0 est la luminance entraînant une acuité nulle. Les luminances L_0 et L_m sont proportionnelles à la luminance du fond. Cette équation peut aussi s'exprimer en fonction du contraste défini comme suit:

$$C = \frac{L_C - L_F}{L_C} \quad (\text{eq 2.28})$$

On peut constater que l'équation 2.27 est du même type que l'équation 2.16 qui décrivait l'influence de l'éclairement pupillaire.

Les tests visuels actuels permettent rarement de déterminer une courbe acuité – luminance du caractère avec un fond de luminance constante. En effet pour la plupart des tests, le contraste entre le caractère et le fond est constant (la lumière est fournie soit par transparence, soit par réflexion). Si nous supposons ce contraste très élevé, c'est-à-dire, correspondant à fond extrêmement sombre, la variation de lumière globale aura un impact négligeable sur l'adaptation (le fond restera suffisamment sombre même lorsque le caractère aura une luminance très élevée). Dans ce cas, l'équation 2.27 peut être modifiée de manière simple en supposant que les paramètres L_0 et L_m sont linéairement dépendants de L_F la luminance du fond: $L_0 = \alpha_0 L_F + \beta_0$ et $L_m = \alpha_m L_F + \beta_m$, et comme le contraste caractère – fond est constant, cela signifie que L_F est proportionnel à L_C . De l'équation 2.28 on en tire: $L_F = (1 - C) \cdot L_C$. d'où l'on déduit alors l'équation suivante pour l'acuité:

$$A = 4 A_M \frac{(L_C [1 - \alpha_0 (1 - C)] - \beta_0)^\beta \cdot ([1 - C] [\alpha_m - \alpha_0] L_C + \beta_m - \beta_0)^\beta}{[(L_C [1 - \alpha_0 (1 - C)] - \beta_0)^\beta + ([1 - C] [\alpha_m - \alpha_0] L_C + \beta_m - \beta_0)^\beta]^2} \quad (\text{eq 2.29})$$

En contraste positif, il est possible d'exprimer la courbe avec une équation du même type:

$$A = 4 A_M \frac{(L_0 - L_C)^\beta (L_m - L_C)^\beta}{((L_0 - L_C)^\beta + (L_m - L_C)^\beta)^2} \quad (\text{eq 2.30})$$

Les équations 2.29 et 2.24 donnent des corrélations identiques, elles représentent donc la même courbe. Comme L_0 et L_m sont proportionnels à la luminance du fond (L_F) on peut en déduire l'hypothèse que l'acuité, pour un contraste caractère – fond fixé, en fonction de la luminance du fond suit une loi aussi du type:

$$A(L_F) = a_0 \ln(L_F - L_C) + a_1 \quad (\text{eq 2.31})$$

Cette équation correspond avec la partie centrale de la figure 2.1 (deuxième segment : pour les acuités comprises entre 0.16 et 15 dixièmes). Des travaux récents mettent en lumière cette loi (réf. [29]).

2.2.4. Eblouissement d'inconfort

2.2.4.1. Indicateur UGR

Nous avons déjà décrit cet indicateur au paragraphe § 2.1.5.3. Il est représenté par les équations 2.3 et 2.4. Un des objectifs de notre recherche consistait à vérifier sa validité dans des conditions de distributions de lumière simulant des conditions réelles.

2.2.4.2. Eblouissement et modèle de Weber-Fechner

Weber et Fechner (cité dans le livre de Piéron: réf. [87]) avaient montré que toute sensation était liée au logarithme du stimulus, en particulier pour la sensation de luminosité provoquée par une surface de luminance homogène suivait une loi logarithmique en fonction de cette luminance. En d'autres termes, une augmentation géométrique de la lumière correspondrait

à une augmentation linéaire de la sensation lumineuse, ce qui se traduit mathématiquement par :

$$\frac{\Delta L}{L} = \text{cste} \quad (\text{eq 2.32})$$

L'éblouissement correspond à une sensation lumineuse associée à un excès de luminosité. Dans le cadre de notre recherche, nous considérons deux éblouissements : celui dû à l'écran (ou document imprimé) et celui dû à l'ambiance lumineuse. Cette séparation nous permet de mettre en avant la zone du champ visuel correspondant à la tâche de l'individu.

Si nous considérons l'écran (ou un document imprimé), que l'on peut représenter comme une surface homogène, sa luminosité peut être perçue comme faible, correcte, forte voir éblouissante. L'hypothèse principale est que la sensation de luminosité, que l'on associe à la variable SL, ne dépend pas exclusivement de la luminance de la tâche, mais aussi des paramètres suivants :

- contraste entre l'écran et son environnement ;
- température de couleur de l'écran ;
- contraste entre le caractère et l'écran ;
- profil visuel du sujet par l'intermédiaire de la luminance physiologique L_m du test C45, l'hypothèse étant que cette luminance caractérise le besoin en lumière de l'individu.

Nous avons traduit mathématiquement ces hypothèses en généralisant la loi de Weber-Fechner : la sensation de luminosité serait une combinaison linéaire du logarithme de chacun des facteurs précisés ci-dessus.

$$SL = \alpha_T \ln(L_T) + \alpha_C \ln(C) + \alpha_e \ln(C_{ec}) + \alpha_L \ln(L_m) + \alpha_{TC} \ln(T_t) + \alpha_R \quad (\text{eq 2.33})$$

L_T = luminance de la tâche (écran ou document imprimé) ;

C = contraste caractère – fond ;

C_{ec} = contraste fond – entourage ;

L_m = luminance physiologique du sujet ;

T_t = température de couleur de la tâche.

La combinaison linéaire est l'hypothèse la plus simple et la plus vraisemblable pour décrire le phénomène. Nous n'avons pas considéré dans ce travail l'effet de la surface qu'occupe l'écran dans le champ visuel et aussi de sa fréquence de balayage. Toutefois, nous avons entrepris de tester la différence de sensation de luminosité entre le document imprimé et l'écran, et celle-ci ne pouvant être due qu'à une différence de surface et(ou) à une différence de stabilité temporelle de la lumière. Rappelons que l'écran est caractérisé par sa fréquence de balayage alors que le document imprimé est illuminé par une source alimentée par un ballast électronique à haute fréquence la rendant quasiment stable.

Si nous considérons l'entourage, il ne s'agit plus d'une surface de luminosité homogène. Alors que, pour une luminance fixée, l'écran peut paraître éblouissant si l'environnement est sombre ou au contraire, sombre si l'environnement est éblouissant, cela ne signifie pas pour autant que l'éblouissement dû à l'environnement est strictement l'inverse de celui dû à l'écran. En fait, il est possible que les deux zones du champ visuel considérées engendrent simultanément un manque de lumière ou un éblouissement. C'est pourquoi nous avons introduit une équation du même type que l'équation 2.32, mais légèrement modifiée. La variable associée à cet éblouissement est l'indice SEGS (Sentiment d'Eblouissement Global Subjectif) :

$$SEGS = \beta_C \ln(C) + \beta_E \ln(C_{ec}) + \beta_L \ln(L_m) + \beta_{TC} \ln(T_E) + \beta_R \quad (\text{eq 2.34})$$

Ici T_E = température de couleur moyenne de l'environnement.

Si on compare les équations 2.33 et 2.32, on constate que nous avons supprimé dans l'équation 2.33 le facteur dû à la luminance de la tâche, car celle-ci n'a d'influence qu'au travers du contraste avec l'entourage. Nous observons aussi la présence du contraste caractère – fond dans l'équation 2.33. En fait, il semblerait que le manque de contraste par apport de lumière parasite sur l'écran soit associé au sentiment d'éblouissement dû à l'entourage.

En résumé, la problématique de base qui a déterminé notre expérimentation se rapporte, à l'étude des paramètres photométriques qui déterminent les réactions subjectives à la lumière et à la performance d'acuité et ceci en tenant compte des facteurs de variation liés aux réponses des sujets et aux paramètres lumineux qui définissent la stimulation lumineuse. Les paramètres les plus importants qui déterminent une ambiance lumineuse sont:

- § La distribution des luminances ;
- § L'éclairement ;
- § L'éblouissement ;
- § La direction de la lumière ;
- § Le rendu des couleurs et la couleur apparente de la lumière ;
- § Le papillotement ;
- § La lumière du jour.

CHAPITRE III

METHODE EXPERIMENTALE

3.1. Introduction

Rappelons que la recherche était principalement composée de trois expériences qui se distinguaient par leur degré de conformité à la réalité du terrain. La première étude se déroulait entièrement en laboratoire, donc en lumière artificielle, permettant un contrôle précis des paramètres photométriques. La deuxième étude se déroulait dans un local prototype, avec un lien visuel vers l'extérieur permettant ainsi d'étudier le mélange de lumière artificielle et naturelle ce qui impliquait un contrôle moins précis de la lumière. La troisième étude se déroulait directement sur le terrain avec l'évaluation en suivi de conditions lumineuses de deux sujets à leur poste de travail, avec une méthode simplifiée du relevé en continu des paramètres photométriques.

Chacune de ces trois expériences devait permettre l'étude de certains aspects spécifiques du confort visuel. Ainsi l'expérience en laboratoire devait permettre l'étude approfondie des relations entre effets d'éblouissement et performances d'acuité. L'expérience dans un local prototype, était destinée à observer le besoin en lumière dans une situation où la lumière artificielle, réglable et disponible en deux températures de couleur, pouvait compléter voire supplanter la lumière naturelle. Enfin, l'expérience de suivis in situ était destinée à introduire les effets dynamiques par l'étude des variations de symptômes visuels et signes d'inconfort et leur relation avec les variations des conditions lumineuses.

La vérification, dans ces trois expériences, des relations attendues entre causes et effets, a nécessité le développement d'un certain nombre d'outils pour enregistrer les réponses subjectives des sujets, leur performance d'acuité avec une précision suffisante, et, rendre compte des paramètres photométriques caractérisant la stimulation lumineuse en terme d'éclaircissements, de température de couleur et de distribution de luminances dans le champ visuel perçu. Les tests d'acuité – relevant du domaine de l'ergophtalmologie - devaient permettre de simuler certains paramètres caractérisant les tâches de travail sur écran et certaines situations de travail où interviennent le contraste inversé et des faibles niveaux d'éclaircissement. Un premier test avec son logiciel a été conçu pour étudier en vision intermédiaire (distance de 60cm) la courbe acuité - contraste sur écran d'ordinateur. Un deuxième test d'acuité sur table lumineuse de fond réglable devait permettre d'étudier en contraste positif ou négatif la relation acuité-contraste avec des luminances et des définitions beaucoup plus élevées que celle de l'écran. Le principal outil photométrique, photoluminancemètre numérique, était constitué d'un appareil photonumérique muni d'un objectif fish-eye calibré en luminance, permettant ainsi de mesurer un grand nombre de points de luminance en même temps.

3.2 Expérience de laboratoire

Pour être à même d'étudier les influences des paramètres photométriques pris en compte, à savoir l'éclaircissement pupillaire et la distribution de luminance, il fallait soumettre les sujets à un certain nombre de situations lumineuses suffisamment variées qui simulaient au mieux la réalité de terrain.

3.2.1. Dispositif expérimental

3.2.1.1 Cas général des séances 1-8

Le dispositif de base était constitué d'un poste de travail à écran entouré de *trois* panneaux lumineux réglables et de deux rangées de luminaires suspendus *également* réglables. Les panneaux, d'une hauteur de 1.50 m et d'une largeur de 1.20 m, contenaient chacun 34 tubes Philips, munis de ballasts électroniques recouverts d'un panneau en plexiglas mat

permettant de diffuser la lumière. Le montage électronique permettait une régulation stable et précise avec des pas de graduations s'étendant de 0 à 1000.

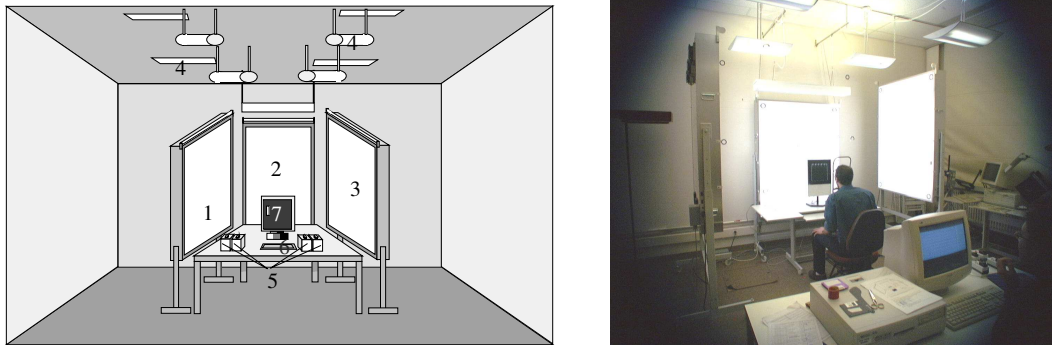


Figure 3.1 Dispositif expérimental de l'expérience de laboratoire.

A gauche, schéma du dispositif avec : trois anneaux lumineux réglables (1, 2 et 3) ; deux rangées de trois lampes suspendues réglables (4) ; deux plots de commandes pour les réglages (5) ; le clavier de réponse des sujets (6) ; l'écran ou la table lumineuse pour l'affichage des tâches (7).

A droite, photographie du dispositif avec un sujet exécutant une tâche sur table lumineuse et, à l'arrière, l'expérimentatrice qui dirige et suit l'expérience sur un écran.

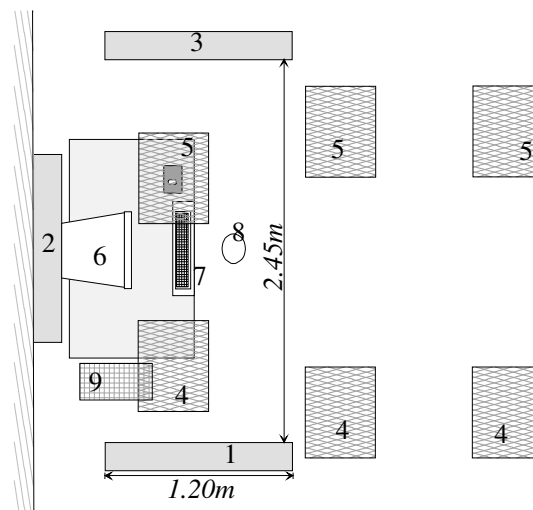


Figure 3.2 Plan à l'échelle de la zone expérimentale avec : 1, 2 et 3, les panneaux lumineux; 4,5, deux rangées de lampes suspendues avec un réglage par rangée; 6, l'écran ou la table lumineuse ; 7, le clavier; 8, l'emplacement du sujet à 60 cm de l'écran) ; 9, l'emplacement de la lampe sur pied placée de manière à éviter au maximum éblouissement et reflets sur l'écran (uniquement pour la séance n°9).

Le panneau n°2, placé contre le mur du fond, simulait une fenêtre faisant face aux sujets (situation assez courante sur le terrain) alors que les panneaux latéraux, 1 et 3, perpendiculaire au mur du fond simulaient des fenêtres latérales. Les luminances de ces panneaux étaient susceptibles d'être ajustées à des valeurs situées entre 200 à 6000 cd/m^2 , ceci pour simuler des situations courantes d'utilisation de la lumière naturelle. Tout en étant munis de tubes avec des spectres moyens identiques assurant le même rendu des couleurs, les températures de couleur des panneaux et des luminaires étaient légèrement différentes (3700 K pour le panneau et 3050 K pour les lampes) [voir figure 3.3].

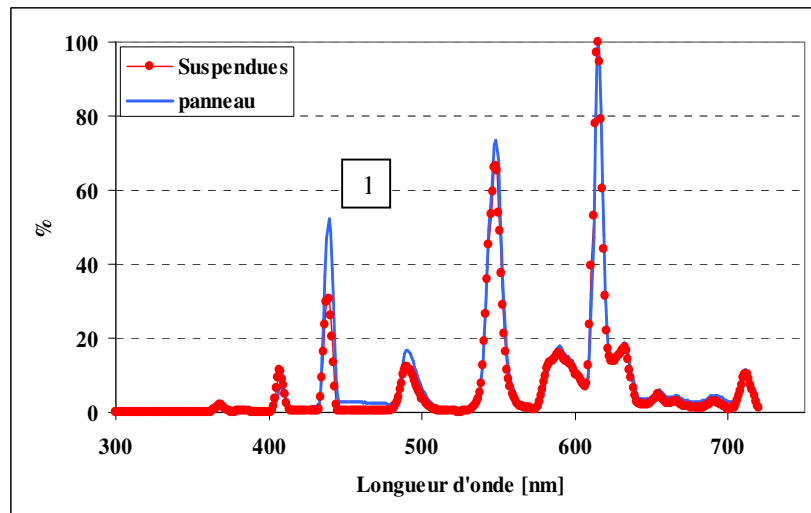


Figure 3.3 Spectres des panneaux lumineux et des lampes suspendues.

On voit sur la figure 3.3 que les deux spectres sont très proches. Leur différence de température de couleur est due essentiellement au pic dans le bleu à 440 nm (chiffre 1 sur la figure) qui est plus marqué pour les panneaux, ce qui peut être lié avec l'adjonction des panneaux en plexiglas.

Les sujets avaient à disposition un écran d'ordinateur leur servant à la fois pour effectuer les tests d'acuité et répondre aux questionnaires. D'autres tests d'acuité ont été réalisés à l'aide de la table lumineuse. Une mentonnière permettait de maintenir la distance œil-tests à 60cm.

3.2.1.2. Particularités de la séance n°9

Pour la séance n°9 (cf. protocole § 3.2.1.1) le dispositif expérimental était complété de deux lampes sur pied de marque Régent réglables (voir figure 3.4), l'une étant munie de tubes Philips PL-L 55W – 950 froids (5000 K) et l'autre de tubes Philips PL-L 55W – 830 chauds (3500 K). Au cours de l'expérience, une seule lampe était utilisée à la fois. Pour changer la température de couleur d'une situation à l'autre, il suffisait à l'opérateur de remplacer l'une des deux lampes par l'autre, cette opération étant plus simple et plus rapide que de changer les tubes eux-mêmes.

Pour cette séance N°9, l'aménagement du poste de simulation était complété par la présence à gauche de l'écran, soit du côté où se trouve le luminaire sur pied, d'un document placé sur un support incliné (cf. fig. 3.5).



Figure 3.4 Lampe sur pied Régent



Figure 3.5 Document sur papier posé sur un support incliné destiné à la séance n°9

3.2.2. Calibrage des ambiances lumineuses et choix des situations expérimentales

3.2.2.1. Calibrage général des luminances et des éclairagements

Pour fixer les conditions lumineuses des 9 situations expérimentales, il a été nécessaire d'établir la relation entre un certain nombre de paramètres photométriques définissant les éclairagements et la distribution de luminance et les graduations des boutons de commande des sources lumineuses.

Les éclairagements mesurés étaient :

- EH = éclairage horizontal au niveau du clavier ;
- EHG = éclairage horizontal à gauche du clavier ;
- EHD = éclairage horizontal à droite du clavier ;
- EY = éclairage vertical au niveau des yeux, mesuré à 60cm de l'écran et la sonde dirigée vers le centre de celui-ci ;
- EV = éclairage vertical au niveau de l'écran.

Les luminances mesurées étaient:

- L_{ij} = 6 points par panneau (les 4 coins, le centre et la luminance maximale (cf. figure 3.6) ;
- L_{mi} = 4 points sur les murs autour du panneau n°2 (face aux sujets) ;
- L_{Li} = luminances des lampes suspendues ;
- L_{me} = luminance maximale dans l'ergorama (<45° de l'axe du regard) ;
- L_{mp} = luminance maximale dans le panorama (>45° de l'axe du regard) ;
- L_n = luminance minimum du noir de l'écran (il faut noter qu'avec le dispositif expérimental choisi, l'écran était protégé des reflets spéculaires).

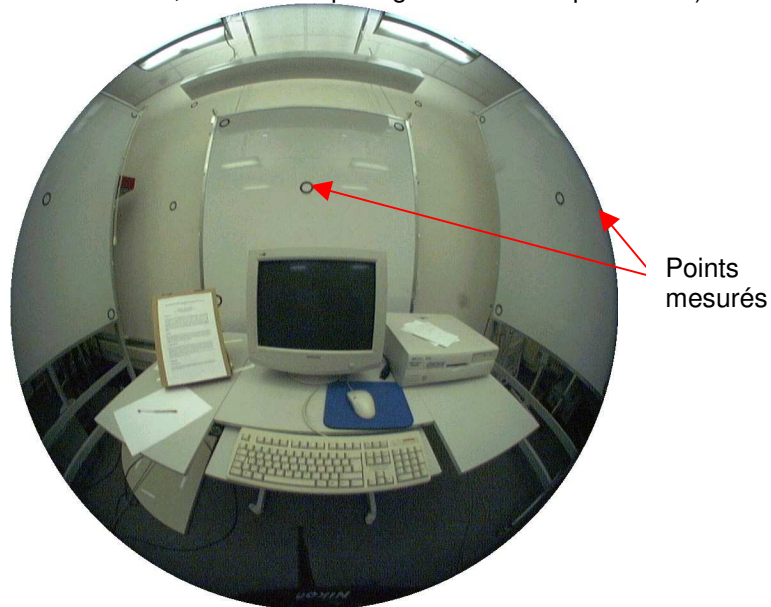


Figure 3.6 Distribution des points de mesure de luminance pour le calibrage. Ces points sont les ronds noirs que l'on voit sur la photographie ci-dessus et à l'intérieur desquels se faisait la mesure.

Etant donné la linéarité de la loi de la propagation de la lumière, la distribution de luminance et les éclairagements sont des combinaisons linéaires du niveau de réglage des différentes sources lumineuses. Les paramètres photométriques ont été mesurés en allumant séparément chacune des 5 sources de lumière (3 panneaux + les 2 rampes de lampes suspendues), et en réglant ces sources à divers niveaux avec le bouton de réglage muni de leur graduation de 0 à 1000.

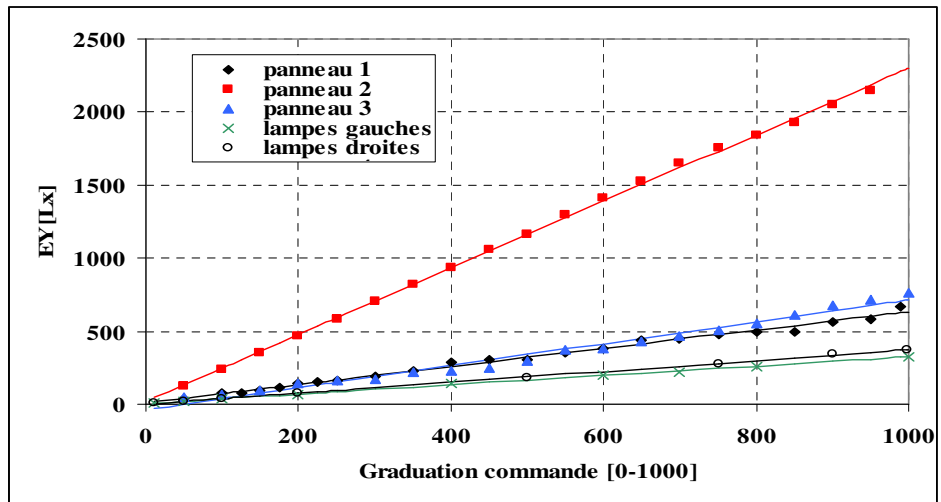


Figure 3.7 Exemple de calibrage de l'éclairage vertical au niveau des yeux (EY), les mesures étant réalisées source par source.

On voit que le panneau N°2 (celui qui fait face au sujet) est celui qui apporte le plus de lumière. Il est suivi des panneaux N°1 et N°3 et, enfin, des lampes suspendues qui représentent la contribution la plus faible. Sur ce graphique et le suivant, les lampes gauches correspondent aux lampes N°4 de la figure 3.1 et les lampes droites, aux lampes N°5.

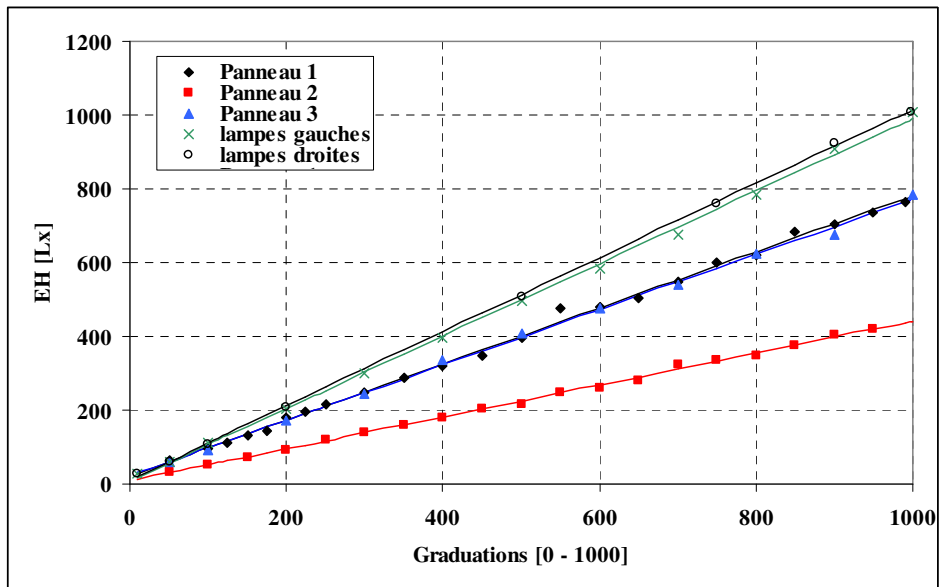


Figure 3.8 Exemple du calibrage de l'éclairage horizontal au niveau du clavier.

On voit que, dans ce cas, c'est le panneau de face qui apporte le moins de lumière, ce qui est dû à la présence de l'écran entre le clavier et le panneau.

Soient : G1, G2, G3 les graduations des boutons qui commandent les panneaux N°1, N°2 et N°3; G4 la graduation correspondant à la rampe de lampes suspendues à gauche et enfin G5 celle des lampes suspendues à droite. Le calibrage a donné les fonctions suivantes:

$$\begin{cases} \text{EH} & \approx 0.76 G_1 + 0.43 G_2 + 0.75 G_3 + 0.98 G_4 + 1.00 G_5 + 74 \\ \text{EHD} & \approx 0.56 G_1 + 0.74 G_2 + 1.36 G_3 + 0.86 G_4 + 1.22 G_5 + 32 \\ \text{EY} & \approx 0.62 G_1 + 2.28 G_2 + 0.75 G_3 + 0.32 G_4 + 0.37 G_5 + 2 \\ \text{Ln} & \approx 0.005 G_1 + 0.004 G_2 + 0.007 G_3 + 0.008 G_4 + 0.010 G_5 + 0.18 \end{cases} \quad (\text{eq 3.1})$$

Les quatre paramètres et leurs équations présentées ci-dessus sont les plus utilisés dans la suite de l'étude :

- l'éclairage horizontal (EH) est la référence des éclairagistes ;
- l'éclairage horizontal à droite du sujet (EHD) permet de connaître la luminance de la feuille posée à cet endroit (voir le déroulement de l'expérience) ;
- l'éclairage vertical au niveau des yeux (EY) correspond au niveau d'adaptation du sujet ;
- la luminance du noir de l'écran (Ln) permet de connaître le contraste caractère–fond de l'écran.

Pour les autres paramètres, voir le tableau dans l'annexe § A-5.

3.2.2.2. Sélection des situations expérimentales

Les sujets étaient soumis, au cours de 8 séances, à 16 ambiances lumineuses caractérisées par leur distribution de luminance. Etant donné qu'il fallait étudier le rôle dans le confort visuel de l'éclairage au niveau des yeux (EY) en le comparant à celui de l'éclairage horizontal (EH), il était nécessaire que ces deux éclairages ne soient pas trop corrélés. Les 16 situations ont donc été sélectionnées en fonction de l'éclairage

horizontal EH et de son rapport $RE = \frac{EY}{EH}$ (sans unité) avec l'éclairage vertical. Il fallait

aussi tenir compte de la nécessité que les éclairages correspondent, pour un écran de luminance relativement faible (au maximum 120 cd/m^2), à un environnement plus sombre que l'écran. De plus, la dynamique maximum des éclairages était limitée par les possibilités offertes par les sources de lumière.

La figure 3.9 représente la sélection de ces situations.

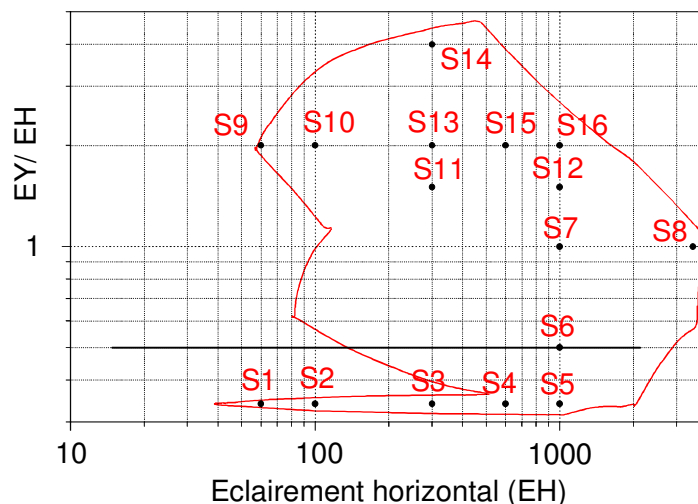


Figure 3.9 Sélection des 16 situations représentées par les points S1 à S16. La zone limitée par la ligne brisée, dans laquelle se trouvent les 16 points, représente l'ensemble des situations que les réglages permettaient d'atteindre.

La complexité de la forme de cette zone (figure 3.9) provient du fait qu'il a été tenu compte de toutes les combinaisons de sources allumées et éteintes. Ainsi, par exemple, les situations S1 à S5 correspondent à des cas où seules les lampes suspendues sont allumées, les panneaux étant éteints.

La figure 3.9 montre que les situations choisies se distribuaient au mieux dans toute la zone correspondant aux possibilités de réglage des sources disponibles. La numérotation de ces situations a été déterminée en tenant compte du problème de l'adaptation des sujets. En effet, lorsque la quantité de lumière augmente en passant d'une situation à l'autre, l'adaptation est beaucoup plus rapide que dans le sens contraire. A noter que l'expérience se faisait par groupes de quatre situations par séance. C'est ce qui explique quelques "mauvaises" successions (par exemple entre les situations 8 et 9 et aussi entre les situations 12 et 13).

Pour l'ensemble des situations, L'éclairage horizontal a varié entre 81 lx et 4370 lx, et le rapport EY/EH entre 0.38 à 2.9. En effet, les valeurs prévues représentées sur le tableau 3.1 ne sont pas exactes à cause des erreurs de mesure que l'équation 3.1 tend à propager et augmenter. Il a donc fallu remesurer ces situations à l'aide du photoluminancemètre numérique.

Sit.	Réglages					valeurs prévues			valeurs mesurées		
	G1	G2	G3	G4	G5	EH [lx]	EY[lx]	RE [-]	EH [lx]	EY [lx]	RE [-]
1	0	0	0	33	28	60	20	0.34	81	35	0.43
2	0	0	0	55	47	100	34	0.34	128	48	0.38
3	0	0	0	165	141	300	102	0.34	351	139	0.40
4	0	0	0	330	281	600	204	0.34	686	263	0.38
5	0	0	0	550	469	1000	340	0.34	1119	433	0.39
6	165	19	100	400	400	1000	500	0.5	1202	886	0.74
7	32	279	80	400	400	1000	1000	1	1203	1163	0.97
8	983	685	800	900	900	3500	3500	1	4370	3745	0.86
9	0	46	0	20	20	60	120	2	94	273	2.91
10	0	76	0	33	33	100	200	2	139	210	1.51
11	34	145	40	90	90	300	450	1.5	419	526	1.25
12	47	479	200	300	300	1000	1500	1.5	1262	1723	1.36
13	84	207	30	60	60	300	600	2	435	679	1.56
14	0	505	0	36	36	300	1200	4	412	1167	2.83
15	63	435	50	160	160	600	1200	2	774	1278	1.65
16	290	689	90	200	200	1000	2000	2	1290	1837	1.42

Tableau 3.1 Liste des réglages des situations sélectionnées par calcul avec les éclairages horizontaux et verticaux, et comparaison des valeurs prévues avec les valeurs mesurées.

A noter que la corrélation entre EH mesuré et EH prévus est de 0.999, celle entre EY mesuré et EY prévu est de 0.991 et enfin celle entre RE mesuré et RE prévus est de 0.904.

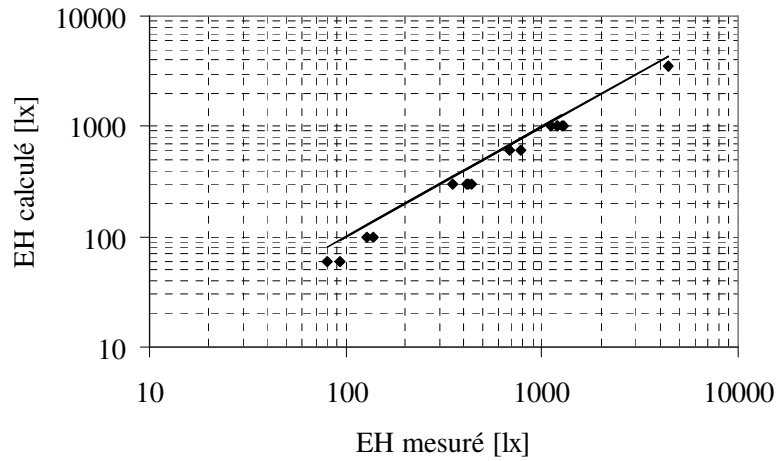


Figure 3.10 Correspondances entre valeurs d'éclairéments horizontaux calculés et valeurs mesurées.

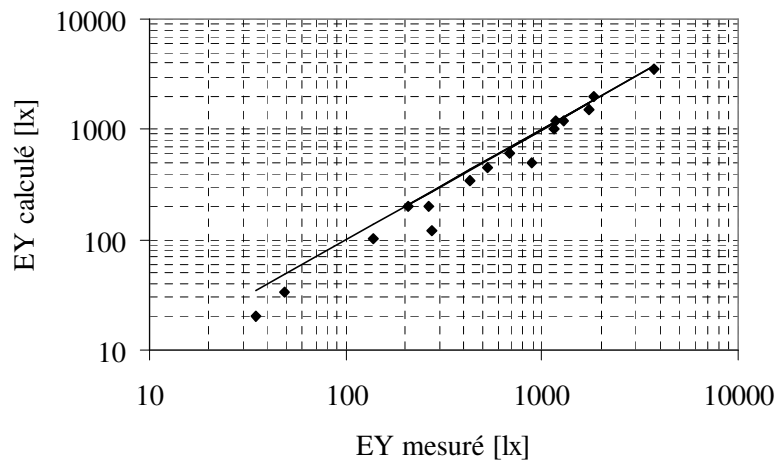


Figure 3.11 Correspondances entre valeurs d'éclairéments verticaux calculées et valeurs mesurées .

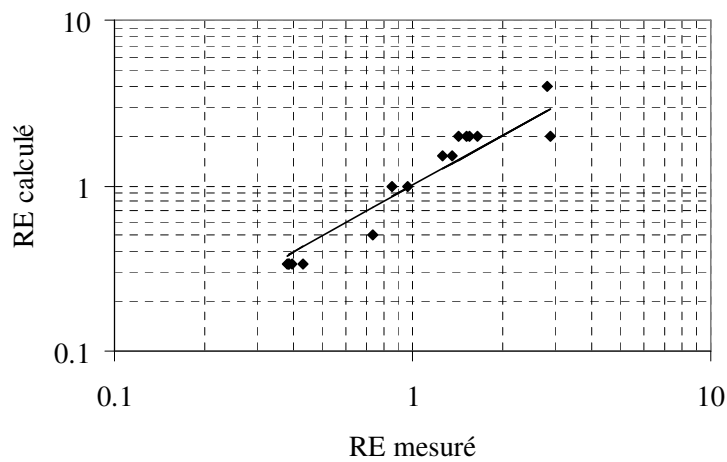


Figure 3.12 Correspondances entre rapports d'éclairéments calculées et rapports des valeurs mesurées.

Les figures 3.10 à 3.12 montrent que les valeurs et rapports d'éclairage calculés par l'équation 3.1 étaient suffisamment cohérentes avec celles qui ont été mesurées. Ces valeurs étaient surtout représentatives des mesures réalisées sur des postes de travail réels analysés sur le terrain (figures 3.13 et 3.14).

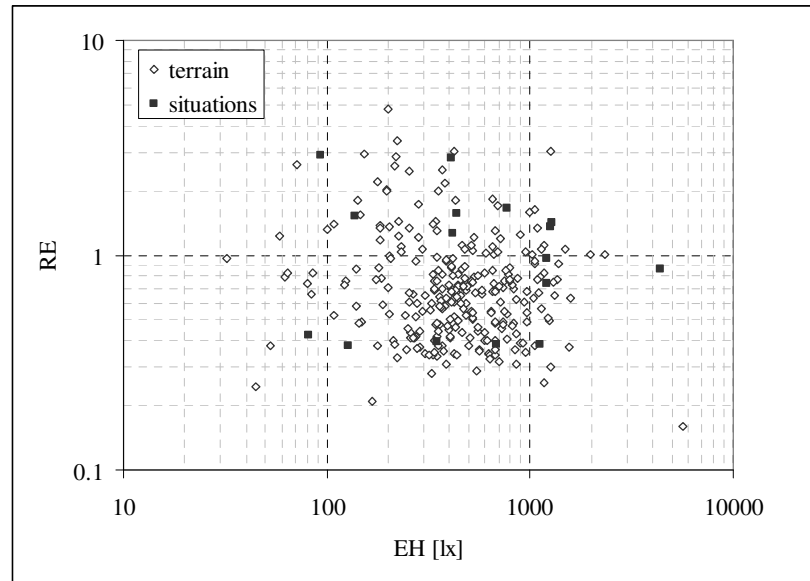


Figure 3.13 Comparaison des mesures sur le terrain (274 postes de travail sur écran) avec les 16 situations du laboratoire.

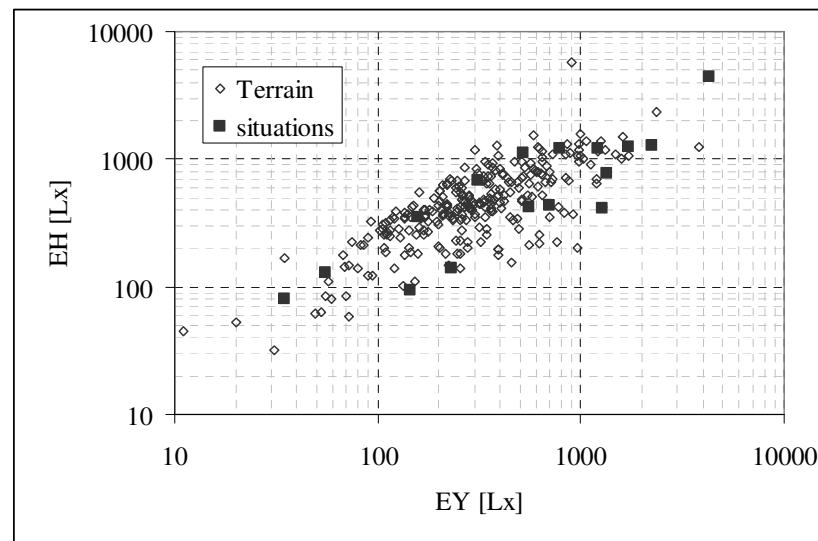


Figure 3.14 Mesures du terrain et laboratoire dans l'espace des éclairages (EY, EH).

On constate qu'il existe une certaine corrélation entre les logarithmes des deux éclairages (0.77 pour le terrain et 0.88 pour le laboratoire), ce qui signifie qu'il était difficile de dissocier totalement ces deux paramètres, mais aussi que les situations simulaient bien celles du terrain.

3.2.2.3. Calibrage spécifique à la séance n°9

Au cours d'une 9^{ème} séance, l'évaluation se faisait avec deux ambiances lumineuses correspondant aux situations 1 et 2 (voir tableau 3.1), mais où seules les lampes suspendues étaient allumées et auxquelles ont rajouté la lampe sur pied. Ces ambiances, qui étaient les plus sombres, ont été choisies afin que les sujets ressentent le besoin d'augmenter la lumière. Etant donné que, d'une part, une seule lampe à la fois pouvait varier et que, d'autre part, celle-ci était fixée à un endroit précis, la distribution de

lumière obtenue ne dépendait plus que du niveau de son réglage. Il suffisait donc d'une seule mesure pour pouvoir déterminer l'ensemble des paramètres photométriques caractérisant l'ambiance lumineuse choisie. Pour des raisons pratiques (la position de la sonde pouvant être très facilement fixée), la mesure choisie était celle de l'éclairement reçu par le document sur le support incliné. Le calibrage consistait donc à pouvoir déterminer les relations entre les autres paramètres photométriques - essentiellement l'éclairement horizontal au niveau du clavier (EH), l'éclairement vertical au niveau des yeux (EY), les températures de couleur correspondantes (TH et TY) et enfin l'éclairement (ED) reçu par le document sur le support incliné.

Calibrage des éclairagements

Soient, au niveau du document, les éclairagements ED_S (quand la lampe sur pied est éteinte), ED et ED_L (éclairage mesuré lorsque seule la lampe sur pied est allumée). De même, au niveau du clavier, les éclairagements horizontaux EH_S , EH et EH_L ainsi que, au niveau des yeux, les éclairagements verticaux EY_S , EY et EY_L .

Les éclairagements EH_S et EY_S étaient connues grâce au calibrage des situations 1 et 2 : $EH_S = 81$ lx, pour la situation n°1 et 128 lx pour la situation n°2 ; $EY_S = 35$ lx, pour la situation n°1 et 48 lx pour la situation n°2 (voir les chiffres dans le tableau 3.1).

On avait :

$$\begin{cases} ED = ED_S + ED_L \\ EH = EH_S + EH_L \\ EY = EY_S + EY_S \end{cases} \quad (\text{eq 3.2})$$

Lorsqu'une seule source apporte la lumière, tous les éclairagements sont proportionnels entre eux. C'était le cas quand la lampe sur pied était allumée seule ou quand la lampe sur pied était éteinte alors que les lampes suspendues étaient allumées (situations 1 et 2). Cela signifiait que ED_S était proportionnel à EH_S et que de même EH_L était proportionnel à ED_L :

$$ED_S = k_s EH_S \text{ et } EH_L = k_L ED_L.$$

En introduisant dans l'équation de ED (équation 3.2) on en déduisait :

$$ED_L = ED - k_s EH_S, \text{ puis dans l'équation de } EH :$$

$$EH = EH_S + EH_L = EH_S + k_L ED_L = EH_S + k_L (ED - k_s EH_S) = (1 - k_L k_s) EH_S + k_L ED$$

Etant donné que k_s et k_L sont des coefficients quelconques, on peut les remplacer par deux autres coefficients, ce qui permettait finalement d'écrire :

$$EH = \alpha_H ED + \beta_H EH_S \quad (\text{eq 3.3})$$

le même raisonnement prévalait pour EY :

$$EY = \alpha_Y ED + \beta_Y EH_S \quad (\text{eq 3.4})$$

Ces deux équations permettaient donc de déterminer EH et EY en fonction de l'éclairement EH_S mesuré au préalable et de l'éclairement au niveau du document.

Le calibrage des éclairagements consistait donc à déterminer les coefficients (α_H , α_Y , β_H et β_Y) en mesurant EH , EY et ED pour différents niveaux de réglages de la lampe sur pied avec les situations 1 et 2, et en réalisant ensuite un fit linéaire.

Coef.	valeurs
α_H	1.191
β_H	0.120
α_Ψ	0.460
β_Ψ	0.027

Tableau 3.2 Valeurs des coefficients déterminées par fit linéaire.

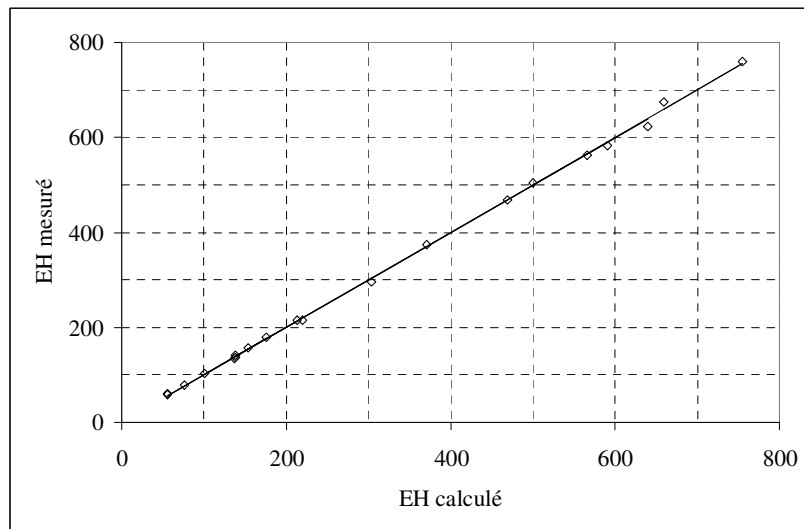


Figure 3.15 Calibrage de l'éclairage horizontal au niveau du clavier. La corrélation de 0.999.

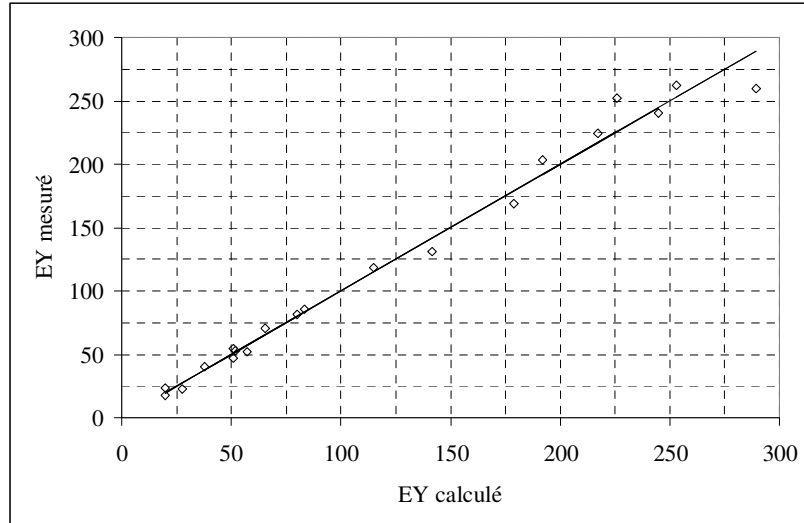


Figure 3.16 Calibrage de l'éclairage vertical au niveau des yeux. La corrélation de 0.993.

Ces graphiques montrent que la lampe sur pied permettait de faire varier l'éclairage horizontal entre 150 lx et au maximum 750 lx. Sachant qu'une fourchette de 300 à 500 lx était préconisée pour le travail sur écran, cela signifiait que l'éclairage minimum, correspondant à la situation du départ, était en dessous des recommandations et donc qu'une situation sombre pouvait à priori amener les sujets à régler leur lumière.

Calibrage des températures de couleurs

Les tubes chauds de la lampe sur pied étaient de la même température de couleur que ceux des lampes suspendues, ce qui signifie que la température de couleur finale

correspondant au mélange de la lampe sur pied et des lampes suspendues ne devait pas varier au cours de l'expérience.

Par contre, en ce qui concerne les tubes froids, le mélange des couleurs était plus complexe. Le calibrage a mis en évidence des fonctions mathématiques (3.5 et 3.6) suivantes.

Ces fonctions étaient les suivantes :

$$TH = 5000 \frac{EH^{1.25}}{EH^{1.25} + 0.686 EH_s^{1.25}} \quad (\text{eq 3.5})$$

Avec le paramètre EH qui est déterminé par l'équation 3.3.

$$\text{et } TY = 4668 - 4818 \frac{EH_s^{1.2}}{EH_s^{1.2} + 1.8278 ED^{1.2}} \quad (\text{eq 3.6})$$

Les figures 3.17 et 3.18 représentent le résultat des calibrages de température de couleur. On constate que les corrélations sont élevées (0.986 et 0.994).

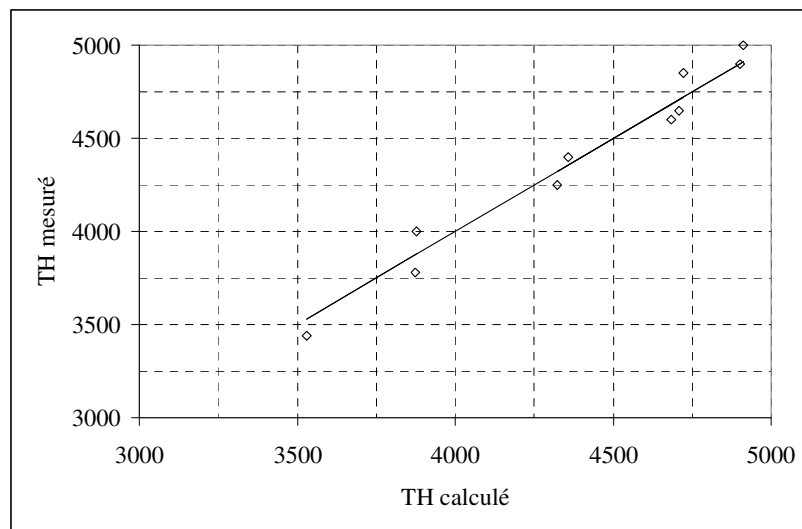


Figure 3.17 Calibrage de la température de couleur, mesurée horizontalement au niveau du clavier, la corrélation était de 0.986.

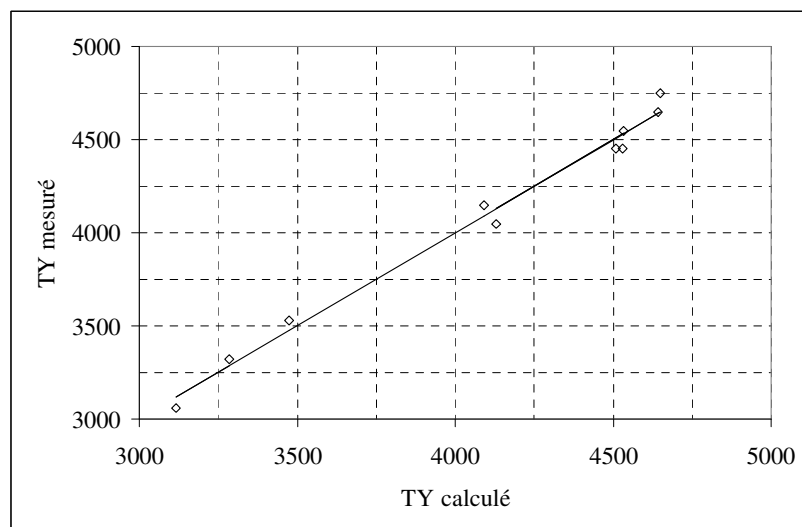


Figure 3.18 Calibrage de la température de couleur, mesurée verticalement au niveau des yeux. La corrélation est de 0.994.

3.2.3. Protocole des séances

3.2.3.1. Séances 1 à 4: performance et perception visuelle sur l'écran

Chaque séance avait une durée d'une heure pendant laquelle les sujets devaient passer des tests visuels sur l'écran et répondre à un questionnaire relatif à l'une ou l'autre des 16 situations décrites au paragraphe précédent. Quatre situations étaient proposées par séance, en respectant bien l'ordre de numérotation de ces situations car, comme il a été écrit dans le paragraphe précédent, cet ordre a été choisi afin de respecter au mieux l'adaptation des sujets.

Le sujet commençait par répondre à un questionnaire de 8 pages présenté sur l'écran sous la forme d'un logiciel qui lui permettait de taper directement ses réponses ou cliquer dans le cas de questions fermées.

Le contenu du questionnaire était le suivant:

- page 1: questions diverses sur l'appréciation de la situation lumineuse et l'"état" du sujet;
- page 2: questions sur la fatigue et les douleurs visuelles (posée uniquement au début de chaque séance) ;
- page 3: on demandait au sujet de régler la luminance de l'écran à 5 cd/m² (réglages prédéfinis) puis d'en évaluer la luminosité ;
- page 4: Une feuille étant préalablement disposée à sa droite, le sujet devait en évaluer la luminosité ;
- page 5: le sujet devait régler la luminance de l'écran à 15 cd/m² et en évaluer la perception luminosité ;
- page 6: même tâche à 30 cd/m² ;
- page 7: même tâche à 60 cd/m² ;
- page 8: même tâche à 120 cd/m².

Les pages 3, 5, 6, 7 et 8, en rapport avec la perception de la luminance d'un écran, étaient toutes constituées des cinq mêmes questions décrites ci-dessous (les chiffres entre parenthèse correspondent aux scores des réponses ; les symboles entre crochets aux questions) :

- 1) [SL] Trouvez-vous que la luminosité de l'écran est:
très faible(1) – faible(2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6)
– *très élevée(7).*
- 2) [SE] Trouvez-vous que cet écran est :
pas éblouissant(1) – un peu éblouissant(2) – éblouissant(3) – très éblouissant(4).
- 3) [ST] Le blanc de cet écran vous paraît-il :
très froid(1) – froid(2) – un peu froid(3) – neutre(4) – un peu chaud(5) – chaud(6) – très chaud(7).
- 4) [SCo] Le contraste sur l'écran vous paraît-il :
trop faible(1) – faible(2) – bon(3) – fort(4) – trop fort(5).
- 5) [SC] Globalement la lumière de l'écran vous paraît-elle :
très agréable(1) – agréable(2) – neutre(3) – désagréable(4) – très désagréable(5).

A noter :

§ que les différentes luminances de l'écran (5, 15, 30, 60 et 120 cd/m²) correspondaient à un réglage fixe calibré dans le noir (sans sources de lumières parasites), ceci pour tenir compte des variations de luminance provoquées par des effets de réflexion variant légèrement en fonction des situations.

§ Les questions se rapportant au document imprimé (page 4) sont les mêmes excepté celles concernant le contraste qui a été supprimé dans ce cas.

§ Après avoir répondu aux questions, le sujet devait passer 5 tests sur écran avec les 5 réglages de luminance proposés dans le questionnaire. Toutefois le temps des séances étant limité, et certains sujets pouvant être plus lents pour passer ces tests, il a fallu parfois limiter le nombre de tests. Dans ce cas, l'opérateur proposait au sujet de ne passer les tests que pour les réglages de 5, 30 et 120 cd/m².

3.2.3.2. Séances 5 à 8: performance sur table lumineuse

Comme pour les tests sur écran, les séances comportaient quatre situations d'une durée d'une heure chacune. Pour chacune des situations, le sujet passait 7 tests visuels avec la table lumineuse. Pour les cinq premiers tests, la luminance était fixée à des valeurs correspondant respectivement à 30, 120, 250, 500 et 1000 cd/m² ; pour les deux derniers tests dont l'un correspondait à un contraste positif et l'autre à un contraste négatif, c'était le sujet qui choisissait la luminance. Comme pour le cas de l'écran, les luminances de la table lumineuse, fixées par réglage prédéterminé, variaient légèrement en fonction des réflexions dues aux situations.

N° test	Réglage	Faut-il le filtre?	Luminance
1	132	Oui	30
2	539	Oui	120
3	30	Non	250
4	65	Non	500
5	135	Non	1000

Tableau 3.3 Liste des réglages prédéfinis de la table lumineuse (avec des graduations allant de 0 à 1000, comme pour les panneaux).

A noter :

- § il fallait utiliser le filtre pour obtenir les luminances les plus basses ;
- § la valeur de 30 cd/m² permettait de faire une comparaison avec le test équivalent sur l'écran (écran réglé à 30 cd/m²) ;
- § si le sujet était trop lent, les réglages 2 et 4 (120 et 500 cd/m²) étaient supprimés.

3.2.3.3. Séance 9 avec réglage d'une lampe sur pied

Pour chacune des deux lampes et des deux situations, les sujets devaient régler à trois reprises la lampe sur pied et répondre à une série de trois questions pour chaque réglage. La lampe sur pied étant toujours réglée au minimum au départ (réglage ramené au minimum entre chaque opération), les réglages s'effectuaient de la façon suivante :

N°1: le sujet devait fixer l'écran, dont la température de couleur était réglée sur 8100 K (correspondant à une lumière de type "froid"), puis, il devait augmenter l'intensité lumière de la lampe sur pied jusqu'à ce qu'il soit satisfait ;

N°2: toujours en fixant l'écran qui avait, cette fois-ci, une température de couleur réglée sur 5900 K (lumière plus chaude), le sujet reprenait le réglage de la lampe sur pied ;

N°3 le sujet devait fixer le document sur le support incliné (voir figure 3.5) et régler la lampe à sa convenance.

Les séances N°4, N°5, N°6 correspondaient au même protocole avec l'autre lampe (...)

Après chaque réglage l'opérateur mesurait l'éclairement reçu par le document et sa température de couleur (ED et TD), puis, posait trois questions, à savoir:

- 1) [SL] Trouvez-vous que la luminosité de l'écran est :

très faible(1) – faible(2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) très élevée(7).

2) [ST] Le blanc de cet écran vous paraît-il :
très froid(1) – froid(2) – un peu froid(3) – neutre(4) – un peu chaud(5) – chaud(6) – très chaud(7).

3) [SC] Globalement la lumière de l'écran vous paraît-elle :
très agréable(1) – agréable(2) – neutre(3) – désagréable(4) – très désagréable(5).

Ces questions concernaient le document sur papier quand le sujet faisait le réglage par rapport à l'écran et inversement.

3.2.3.4. Séance 10 avec éblouissement global

Les sujets étaient soumis aux mêmes 16 situations proposées lors des séances 1 à 8, mais devaient répondre à une nouvelle série de questions se rapportant plus spécifiquement à un effet d'éblouissement global. Les sujets étant soumis aux 16 situations au cours d'une seule séance, des dispositions ont été prises afin de minimiser le problème de l'adaptation. C'est ainsi qu'un laps de temps d'adaptation variant entre 30 s à 3 mn était prévu entre chaque situation.

Les autres conditions d'expérimentation se distinguaient de celles des séances 1 à 8, par les points suivants:

§ la luminance de l'écran était fixée à 100 c/m² ;

§ pour la première question, le sujet devait porter son regard un peu partout, alors que pour les neuf suivantes le sujet devait impérativement fixer l'écran ;

3.3. Expérience en local prototype

3.3.1. Dispositif expérimental

L'expérience avait lieu à l'intérieur d'un container de 6m de long, de 3m de large et de 3m de haut situé en champ libre, à proximité de celui qui avait servi à établir le profil des sujets. (voir figure 3.19). Le container, dont la paroi vitrée était orientée vers le sud, avait été aménagé comme le prototype d'un local de bureau informatisé courant.



Figure 3.19 Locaux prototypes, celui de gauche sur la photographie a été totalement obscurci pour des tests visuels de référence, celui de droite était celui utilisé pour l'expérience en elle-même.

Le bureau dont disposaient les sujets, était placé à 1.25 m de la fenêtre et orienté vers le mur de face (voir figure 3.20).

Le local était équipé de deux rampes de luminaires directs au plafond ainsi que de deux lampes réglables sur pied, interchangeables, installées au centre du local, l'une était munie de tubes de température de couleur chaude (3000°K), l'autre de tubes froids (5000°K).

Les fenêtres étaient munies de stores extérieurs opaques, et de stores intérieurs à lamelles verticales. Des caches en carton opaque étaient à disposition pour boucher totalement les fenêtres afin de créer une situation de lumière entièrement artificielle.

Etant donné que l'expérience s'est déroulée au cours d'une période très ensoleillée (juin 2001),

les stores intérieurs étaient en partie fermés (voir photo de la figure 3.20) et les caches en carton recouvraient la partie haute de la fenêtre. En effet, ces aménagements permettaient de garantir une ambiance lumineuse plutôt homogène et relativement sombre (entre 200 et 500 lx).

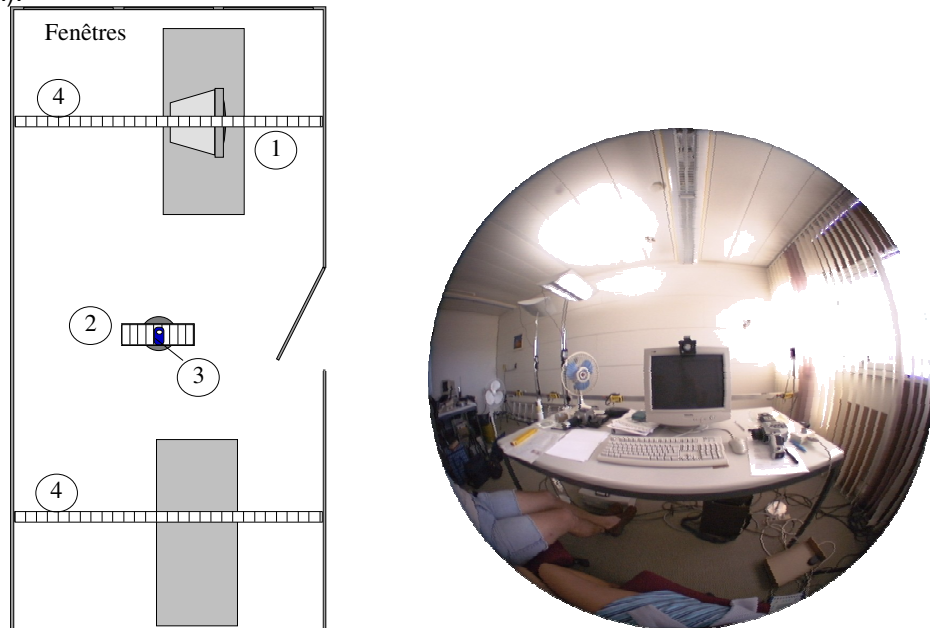


Figure 3.20 *Image de gauche*: plan du local. (1)= emplacement du sujet ; (2)= lampe sur pied ; (3)= sonde d'éclairage pour la mesure du niveau de réglage de la lampe sur pied, (4)= rampes de tubes fluorescents au plafond.

Image de droite: exemple photographie fish-eye prise depuis l'emplacement du sujet.

L'expérimentateur avait à disposition un luxmètre-chromamètre, l'affichage d'une sonde de luxmètre placée dans le luminaire sur pied (pour contrôler le niveau choisi par les sujets), un luminancemètre et l'appareil photonumérique décrit au paragraphe 3.6.5. Il faut noter que, dans le cas de cette expérience, cet appareil a servi uniquement au relevé des conditions lumineuses et au repérage angulaire du champ visuel. En effet, à l'époque de cette expérience, le calibrage photométrique de l'appareil photonumérique n'était pas encore réalisé. Une sonde thermo-hygrométrique couplée à un data-logger était posée à proximité du sujet.

3.3.2. déroulement de l'expérience

Le même protocole était appliqué au cours d'une séance d'une heure environ dans quatre conditions lumineuses différentes.

§ La condition N°1 correspondait à un éclairage entièrement artificiel (la fenêtre était bouchée entièrement ce qui empêchait totalement la lumière naturelle de pénétrer).

§ La condition N°2 correspondait à un éclairage fourni par la seule lumière naturelle, avec les stores positionnés comme décrit au paragraphe précédent.

§ Dans la condition N°3, les sujets devaient compléter l'éclairage naturel au moyen de la lampe sur pied avec tubes froids et ajuster leur niveau optimal.

§ La condition N°4 était la même que la condition N°3, à la seule différence que la lampe sur pied avait des tubes chauds. Les conditions N°3 et N°4 mêlaient donc lumière artificielle et lumière naturelle.



Figure 3.21 Photographies fish-eye des quatre conditions proposées aux sujets. De gauche à droite: lumière artificielle pure ; lumière naturelle pure ; lumière naturelle + lumière artificielle froide et lumière naturelle + lumière artificielle chaude.

Pour chaque condition, les sujets devaient répondre à un questionnaire et passer un test sur écran, la luminance de ce dernier étant fixée à 100 cd/m^2 (sans tenir compte du reflet). Le questionnaire était composé de plusieurs parties, l'une correspondant à la fatigue visuelle, et les autres correspondant à la perception de l'environnement lumineux (voir § 3.6.2.3).

L'opérateur devait, lui, relever pour chaque conditions un certain nombre de valeurs photométriques (la mesure se faisait quand le sujet avait fini ses tests).

Les valeurs photométriques relevées étaient les suivantes :

- luminance minimale de l'écran éteint ;
- luminance du reflet de l'écran (ou luminance maximale s'il n'y avait pas de reflet) ;
- luminance maximale dans l'ergorama (tout ce qui est à moins de 45° dans le champ visuel) ;
- luminance maximale dans le panorama (au delà de 45°) ;
- éclairement horizontal mesuré au niveau du clavier ;
- température de couleur horizontale mesurée avec la même sonde (luxmètre – chromamètre) que pour l'éclairement horizontal ;
- éclairement vertical mesuré au niveau de l'œil du sujet, la sonde étant dirigée vers le centre de l'écran ;
- température de couleur verticale ;
- l'éclairement du niveau lumineux des lampes sur pied (uniquement dans les situations 3 et 4).

Avant chaque série de mesure, l'opérateur devait prendre une photographie fish-eye du champ visuel du sujet.

Parallèlement à ces relevés, un enregistrement automatique de la température de l'air et du taux d'humidité relatif se faisait en continu tout au long de l'expérience.

3.4. Expérience de suivis

3.4.1. Dispositif expérimental

Par sa nature même, cette expérimentation faite sur les sites respectifs de deux collaborateurs d'un laboratoire de recherche, impliquait uniquement l'emplacement des appareils de mesure ainsi que le protocole d'enregistrement des réponses des sujets. L'opérateur n'intervenait que pour donner les instructions au début de l'étude.

Mesures:

Les mesures effectuées tout au long de l'expérience au moyen de 4 sondes étaient des éclairiments, la température de couleur, la température de l'air et le taux d'humidité. Trois des sondes, un luxmètre-chromamètre, le thermomètre et l'hygromètre étaient fixés sur une potence (voir figure 3.22) placée à l'arrière du sujet, dans une position optimale. En

particulier, la sonde d'enregistrement de l'éclairement vertical et de la température de couleur correspondante devait être placée le plus près possible du sujet sans que celui-ci soit perturbé dans son travail. La quatrième sonde était un luxmètre placé au niveau du tube fluorescent de la lampe sur pied susceptible d'être réglée par le sujet.

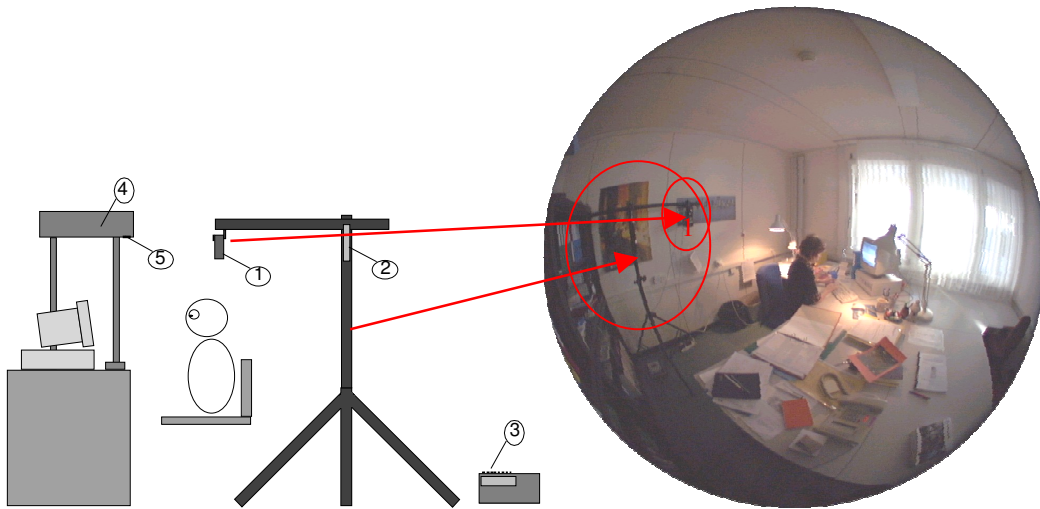


Figure 3.22 Dispositif expérimental. (1) = sonde luxmètre-chromamètre, (2) = sonde thermomètre – hygromètre, (3) = data logger, (4) = Lampe sur pied réglable avec tubes interchangeables, (5) = réglage des tubes, avec sonde permettant de déterminer le niveau d'allumage des tubes. A noter que sur la photo de droite la lampe sur pied n'était pas encore installée.

Le luxmètre était placé près de la tête du sujet afin qu'il mesure une lumière correspondant au mieux à la lumière perçue par le sujet.

Toutes les sondes étaient reliées à un data logger permettant d'enregistrer les mesures toutes les 10 secondes pendant 9 jours.

Lampes:

Les sujets disposaient de deux lampes sur pied réglables. Il s'agissait des mêmes lampes utilisées lors de la séance 9 (voir § 3.2.1.2 et figure 3.4). L'une était munie de tubes froids (5000 K) et l'autre de tubes chauds (3000 K).

Logiciels:

Deux logiciels ont été installés dans l'ordinateur des sujets (avec leur accord). Le premier, développé dans notre laboratoire, était un questionnaire auquel le sujet pouvait répondre par simple clic de la souris. Le deuxième était une simple horloge permettant de lancer le premier logiciel à des heures programmées.

3.4.2. Déroulement de l'expérience

Les sujets devaient répondre à trois questionnaires présentés à différents moments précis de la journée. Le premier questionnaire, destiné à établir un indice de plainte (voir §3.6.2.1), était proposé une fois le matin quand les sujets arrivaient à leur poste de travail et une fois le soir au moment du départ. Le deuxième questionnaire, destiné à rendre compte de l'activité des sujets au cours de la journée (voir §3.6.2.4) était proposé le soir. Le troisième questionnaire, permettant aux sujets de s'exprimer sur l'ambiance lumineuse (voir § 3.6.2.3) était proposé cinq fois par jour (le matin en arrivant, à 9h, à 11h, à 14h, à 16h et le soir en partant).

L'expérience durait 9 jours divisés en 3 phases de 3 jours. Dans la première phase, les sujets devaient utiliser la lampe sur pied munie de tubes chauds, dans la seconde phase, les tubes chauds étaient remplacés par des tubes froids et dans la dernière phase, les sujets devaient utiliser l'éclairage usuel de leur bureau.

D'une durée relativement longue, seuls deux sujets ont mené cette expérience correctement jusqu'au bout. En effet les résultats de trois autres sujets n'ont pu être comptabilisés, le nombre de réponses étant trop bas. Ces personnes étaient, en effet, très concentrées dans leur travail, et oubliaient trop souvent de répondre aux questions.

Néanmoins, le bilan de l'expérience des deux "bons" sujets était suffisamment intéressant pour être retenu. Le profil de ces deux sujets était le suivant :

- sujet 1 : 26 ans, assistant doctorant, pas de défaut visuel, horaires libres, tâche principale de programmation sur son PC:
- sujet 2 : 36 ans, technicien, pas de défaut visuel, horaires fixes (7h-16h), tâches diverses sur son PC avec tâche principale de dessins de plans.

On voit donc que ces deux sujets se distinguaient essentiellement par l'âge et leur activité.

3.5. Recrutement des sujets

Le choix des sujets avait une grande importance. Devant représenter la population active des opérateurs sur écrans, il fallait que ceux-ci répondent à un certain nombre de critères, tels que l'âge, leur status visuel, et aussi la fréquence d'utilisation de l'outil informatique.

Il aurait été souhaitable aussi de disposer toujours du même groupe de sujets pour l'ensemble de l'expérience, mais cela n'était pas possible à cause de la trop grande disponibilité que cela supposait. Il avait été prévu de disposer de 42 sujets. Mais il s'est avéré nécessaire d'en recruter de nouveaux, ce qui a porté le nombre total de sujets à 62.

Les principales caractéristiques (âges, défauts visuels, performance au test C45) de ces sujets, ont été comparées à celles d'un collectif témoin de 1347 utilisateurs de l'informatique évalués lors de diverses expertises ergonomiques (Réf. [72], [73], [75]).

Bien que représentant toutes les classes d'âge de 19 à 69 ans, le collectif de l'expérience avec un âge moyen de 28 ans, comportait, par rapport au collectif de terrain dont l'âge moyen était de 38 ans, davantage de sujets âgés de moins de 40 ans.

Concernant le port de corrections, les sujets de l'expérience étaient très proches du groupe témoin. Les figures 3.25 et 3.26 montrent que, dans les deux groupes, 66% des sujets étaient porteurs d'une correction et que parmi ceux-ci la plus grande majorité était myope (80% pour les sujets du laboratoire et 60% pour le groupe témoin). En considérant le nombre de défauts visuels associés (cf. figure 3.2) les deux groupes étaient très semblables : environ 60% des sujets n'avaient qu'un seul défaut alors que 30% en avaient deux à la fois (souvent myopie et astigmatie ou myopie et presbytie).

Outre leurs défauts visuels, les sujets étaient aussi définis par leur performance à une batterie de tests ergophtalmologiques, parmi lesquels, le test C45 dont est issu le couple de paramètres (L_M , V_M), prend dans cette étude une place déterminante pour caractériser le profil visuel des sujets. Des résultats antérieurs (cf réf. [72], [73], [75], [26], [27],[28]) ont en effet montré que c'est le couple acuité luminance qu'il faut considérer, car il devrait rendre compte de la gêne à la lumière des sujets (cf. § 2.2.4.4). De fait, on a pu mettre en évidence une meilleure cohérence en terme d'acuité qu'en terme de luminance (figures 3.28 et 3.29). D'autre part, les différences dans les distributions de L_M et V_M (figures 3.28 et 3.29) peuvent s'expliquer par un effet de l'âge ou la présence de défauts plus ou moins corrigés.

En effet, les sujets de l'expérience ont eu besoin de plus de lumière que ceux du groupe témoin, (la valeur moyenne de L_M était de 34 cd/m^2 pour les sujets de l'expérience alors que pour le groupe témoin cette moyenne n'était que de 16 cd/m^2).

L'acuité était supérieure chez les sujets de l'expérience (32% d'entre eux atteignaient le maximum de 15 dixièmes contre seulement 17% dans le groupe témoin) ce qui était dû à la légère différence d'âge.

En ce qui concerne l'utilisation d'un écran, les deux collectifs ne se distinguaient guère par la durée moyenne du travail sur écran (le collectif témoin : 4.5 heures par jour et pour le collectif de l'expérience : 4.4 heures par jour). Cependant la figure 3.30 montre que dans ce dernier, comportait davantage de sujets (40% contre 19%) travaillant moins de 3h. Sachant que la sollicitation réelle est aussi déterminée par la nature de la tâche et le degré

de liberté dans la gestion du temps, on peut supposer que les sujets de l'expérience, pour la plupart des étudiants et des collaborateurs de centre de recherche étaient des utilisateurs expérimentés de l'outil informatisé, et bénéficiant d'un certain degré de liberté étaient moins exposés que ceux du collectif témoins.

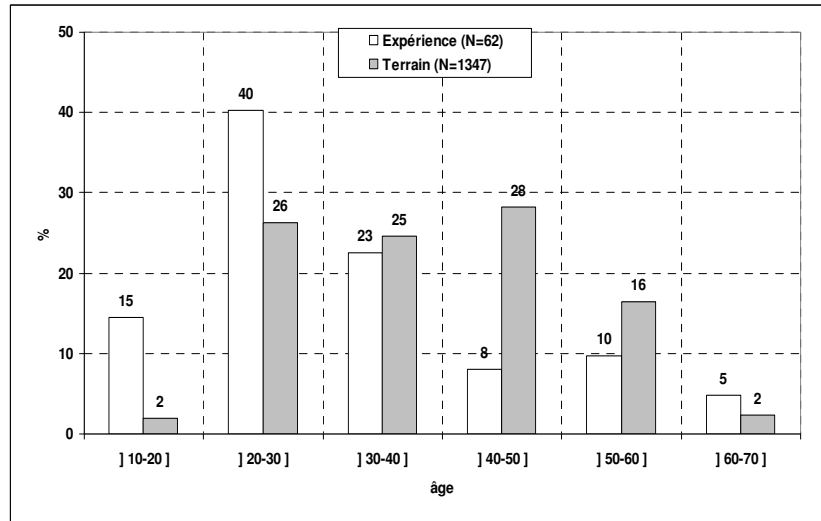


Figure 3.23 Distribution des âges.

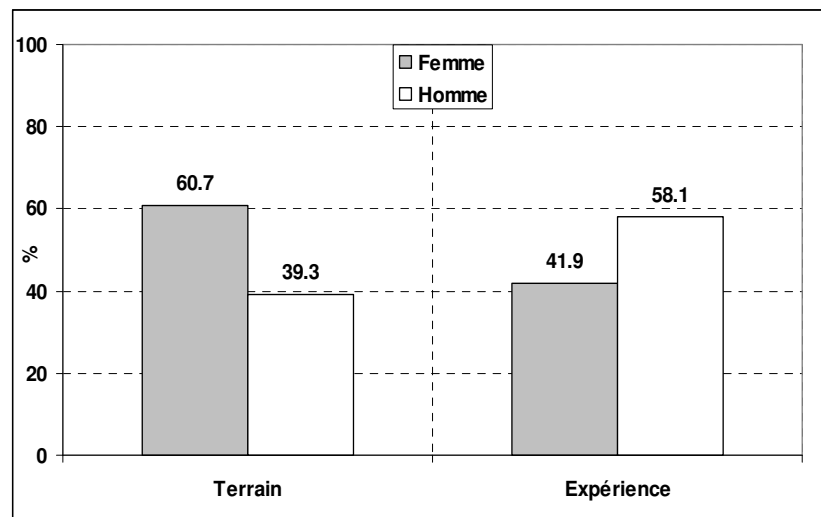


Figure 3.24 Distribution des sexes.

La figure 3.24 montre que le groupe de sujets de l'expérience était plutôt masculin contrairement au groupe témoin du terrain.

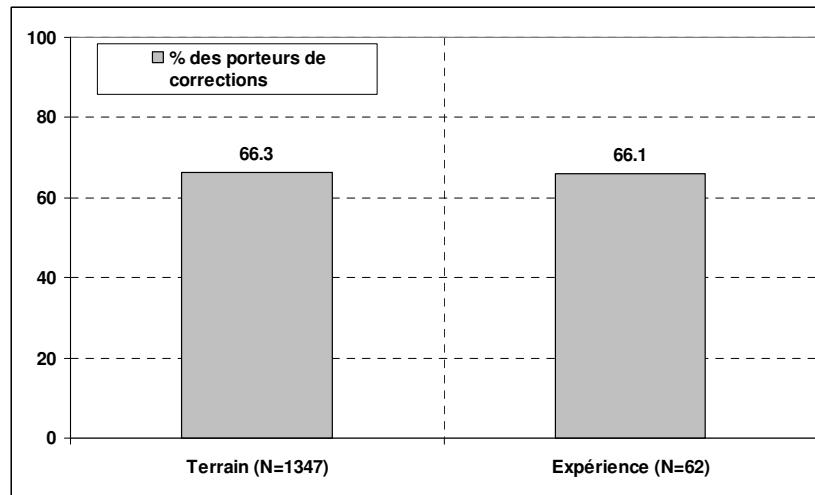


Figure 3.25 Distribution des porteurs de corrections.

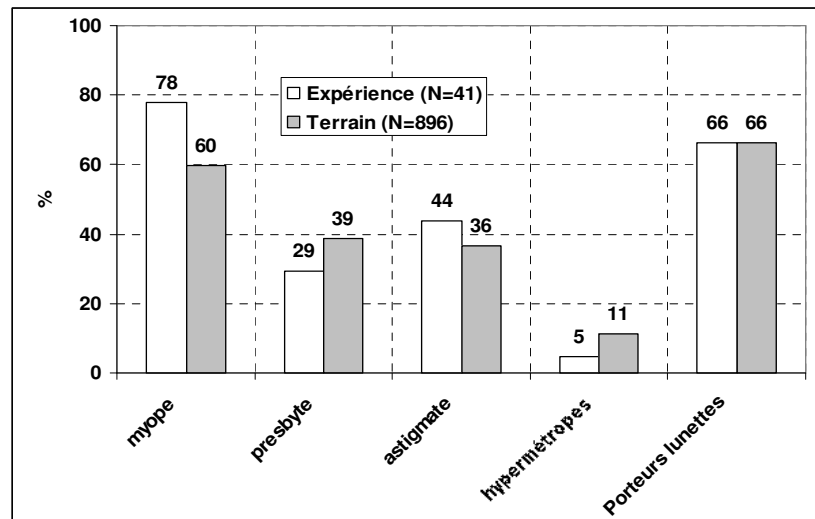


Figure 3.26 Distribution des principaux défauts visuels. A noter que la somme des pourcentages ne fait pas 100, étant donné que beaucoup de sujets présentaient plusieurs défauts visuels en même temps.

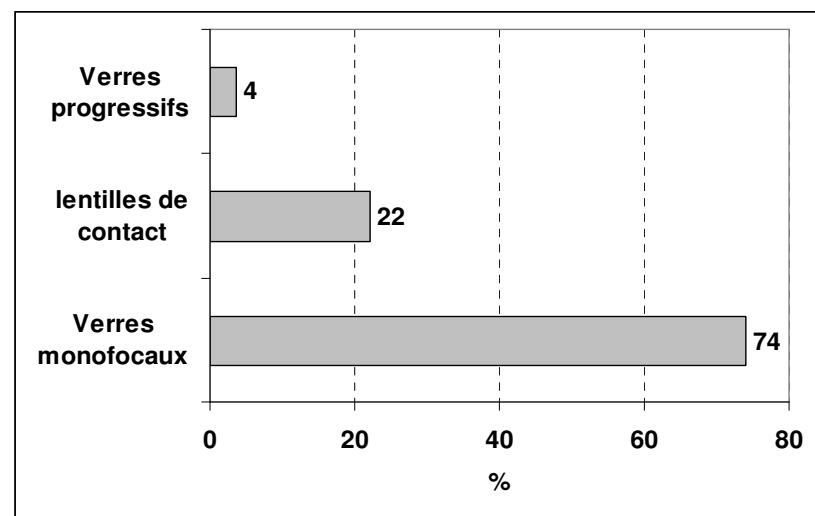


Figure 3.27 Distribution des types de correction des sujets de l'expérience, 74% utilisaient des verres monofocaux.

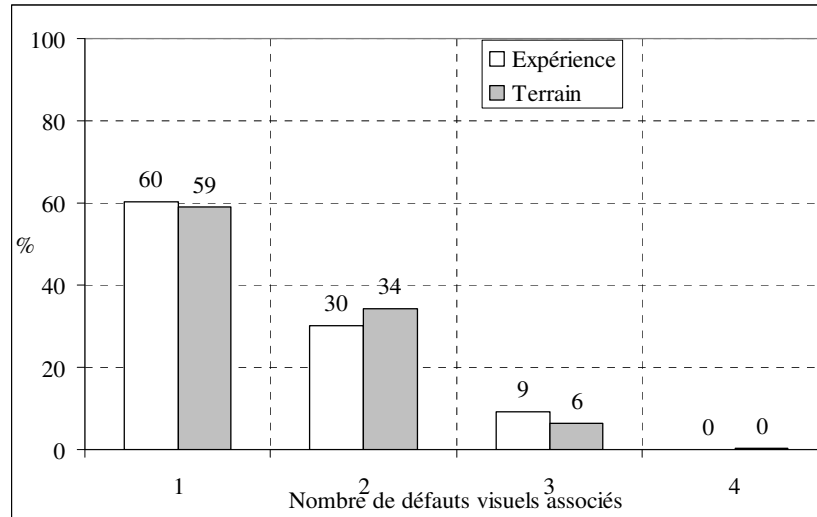


Figure 3.28 Distribution du nombre de défauts visuels associés (avec pour certains sujets jusqu'à 3 défauts visuels).

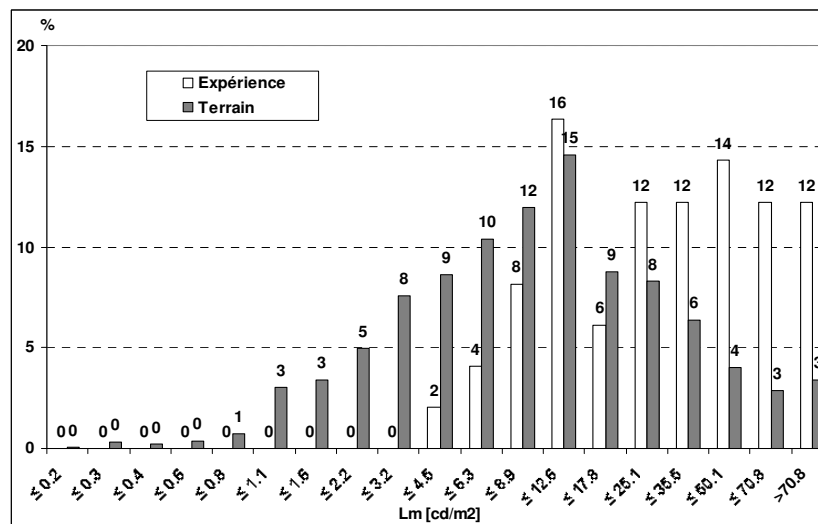


Figure 3.29 Distribution de Lm (en coordonnées logarithmiques), paramètre issu du test C45 supposé représenter la luminance physiologique des sujets.

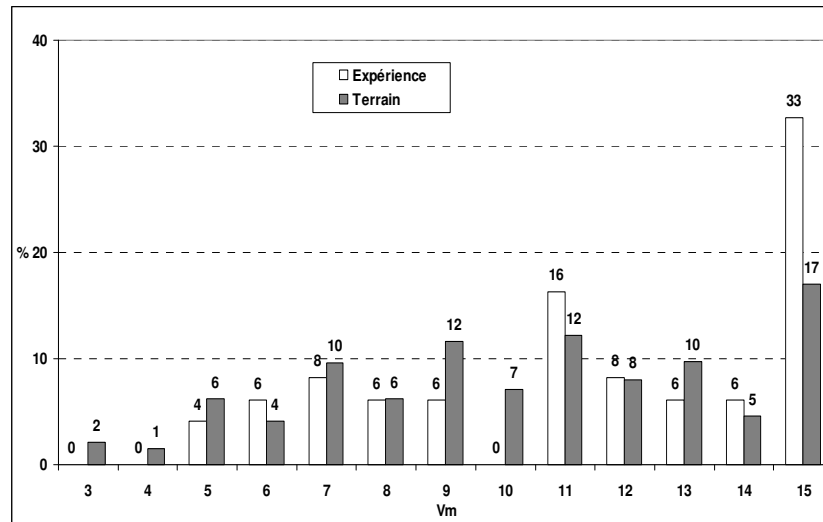


Figure 3.30 Distribution de Vm, acuité du sujet mesurée avec le test C45. A noter que la limite de 15 dixièmes que permettait ce test, explique que sur le graphique le pourcentage de sujets ayant une acuité de 15 dixièmes est nettement plus élevé que pour le reste des acuités. Il y a un effet de cumulation de valeurs.

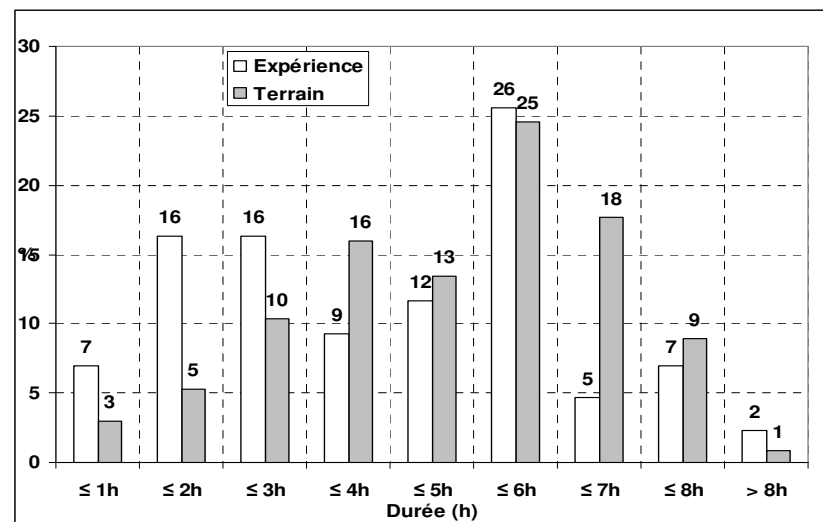


Figure 3.31 Distribution de la durée moyenne que les sujets passaient à travailler devant un écran d'ordinateur.

Dans le collectif des 64 sujets recrutés la participation à l'une ou l'autre des expériences était la suivante:

- § 2 sujets ont participé uniquement à l'expérience de suivi ;
- § 42 sujets ont participé uniquement à l'expérience dans le local prototype ;
- § 25 sujets ont participé à l'expérience du local prototype et aux séances 1 à 8 de l'expérience de laboratoire ;
- § 15 sujets ont participé à l'expérience du local prototype et aux séances 1 à 9 de l'expérience de laboratoire ;
- § 21 sujets ont participé uniquement à la séance n° 10 de l'expérience de laboratoire.
- § 1 seul sujet a participé à toutes les expériences.

Ainsi, si comme on a vu plus haut, les 62 sujets pris ensemble représentaient assez bien la population, les différents groupes pris séparément avaient des profils plus variés. Les figures (3.31 et 3.32) et le tableau (3.4) montrent que les 21 sujets de la séance n°10 se différencient des autres groupes. Ils étaient en effet globalement plus âgés (voir tableau

3.4) que les autres groupes, ce qui avait pour conséquence un plus grand pourcentage de porteurs de lunettes, surtout de presbytes.

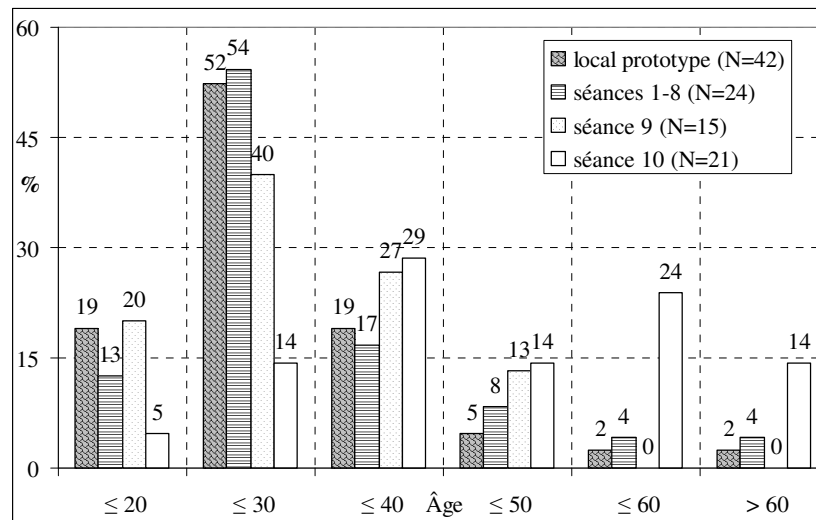


Figure 3.32 Comparaison de la distribution des âges pour quatre principaux groupes de sujets de l'expérience (les chiffres entre parenthèses dans la légende correspondent aux nombres de sujets par groupes).

Groupes	% porteurs de corrections	Age moyen
Local prototype	61.9	28.1
Séances 1 à 8	62.5	30.5
Séance 9	66.7	29.9
Séance 10	76.2	44.0

Tableau 3.4 Liste des âges moyens et du pourcentage de porteurs de lunettes pour les quatre groupes.

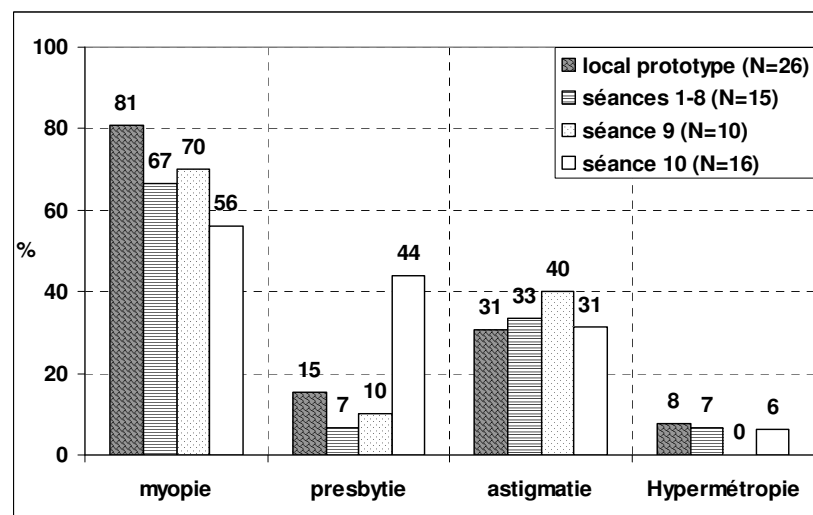


Figure 3.33 Comparaison des différents défauts visuels pour les quatre groupes. Les chiffres entre parenthèses dans la légende correspondent aux nombres de porteurs de correction par groupes.

En conclusion, les sujets des deux expériences principales (local prototype et laboratoire) avaient un profil assez proche de celui des utilisateurs professionnels de l'outil informatique. Toutes les catégories d'âges (19 à 69 ans) étaient bien représentées, de même que les principaux défauts visuels que l'on peut rencontrer sur le terrain.

3.6. Les outils développés

3.6.1. Préambule

Les quatre outils développés dans cette étude étaient les suivants:

- des questionnaires informatisés ;
- un test d'acuité sur écran d'ordinateur ;
- un test d'acuité test sur table lumineuse ;
- un photoluminancemètre numérique.

Les questionnaires ont été optimisés selon deux critères: ils devaient, d'une part, traduire au mieux les sentiments des sujets en terme de spécificité et de sensibilité et, d'autre part, faciliter l'analyse et l'étude de leurs relations avec leurs déterminants supposés. Ces questionnaires étaient informatisés, ce qui permettait d'éviter de les saisir manuellement (la saisie manuelle engendre inévitablement des erreurs) et apportait une sécurité dans l'enregistrement des données. L'informatisation des questionnaires permettait également aux sujets de répondre aux questions concernant l'écran, sans nécessairement changer l'axe du regard.

Les tests visuels ont été créés, d'une part, pour simuler la tâche de lecture et, d'autre part, pour mesurer l'acuité visuelle avec une précision plus importante qu'avec les tests classiques. Le test sur écran devait permettre l'étude plus spécifique de la relation acuité – contraste (contraste caractère-fond). Le test sur la table lumineuse devait permettre, quant à lui, d'établir cette même relation pour la luminance de fond quand le contraste "caractère – fond" est constant.

Le photoluminancemètre numérique était destiné à mesurer la distribution de luminance dans le champ visuel. Lors de l'expérience en laboratoire, il était indispensable de connaître cette distribution pour chaque situation proposée aux sujets, ceci, pour les trois raisons suivantes: 1) pour mieux appréhender les paramètres photométriques du confort visuel ; 2) pour intégrer les indices d'éblouissement existants (tel que l'UGR) ; 3) pour tester un instrument destiné aux évaluations de terrain.

3.6.2. Questionnaires

Quatre questionnaires utilisés pour l'analyse ergonomique ont été adaptés aux exigences des conditions d'expérimentation. Un premier questionnaire permettait d'établir le profil du sujet. Le deuxième questionnaire comportait des indicateurs de l'astreinte visuelle à travers un indice (appelé indice de plainte). Ce questionnaire a été employé au cours de tous les volets de l'expérience. Un troisième questionnaire servait à rendre compte de l'activité, sur écran, des sujets participant à l'expérience de suivis. Le quatrième questionnaire concernait la perception de l'ambiance lumineuse. L'investigation du terrain avait montré qu'il fallait être très attentif aux questions et à la façon de les poser. En effet, quand on parlait d'éblouissement ou de quantité de lumière globale, les sujets avaient beaucoup de mal à répondre de manière nuancée, sauf s'ils n'avaient qu'une seule source de lumière dans leur champ visuel. Le problème se compliquait encore davantage quand les sujets devaient se prononcer sur l'ambiance lumineuse en terme de chaleur ou de froideur. C'est pourquoi, en fonction des observations, les questionnaires ont été légèrement modifiés en fonction du type d'expérience, tout en maintenant les questions de base tout au long de la recherche. Ainsi, par exemple, il s'est avéré nécessaire de poser les questions de perception pour chacune des sources de lumière du champ visuel considérée séparément. A noter que chronologiquement l'expérience en local prototype était la première à avoir été

réalisée, avant l'expérience de suivis qui s'est déroulée en même temps que le début de l'expérience en laboratoire (séances 1 à 8).

3.6.2.1. Questionnaire relatif aux plaintes visuelles

A l'origine, ce questionnaire était proposé aux sujets sur le terrain et les questions se rapportaient à leurs plaintes visuelles en terme de symptômes d'asthénopie et de fatigue visuelle et de signes associés, le soir après le travail. Pour l'expérience, il fallait adapter ces questions pour évaluer les réactions visuelles du moment. Pour les expériences en laboratoire et en local prototype, ce questionnaire servait essentiellement à connaître l'état de "fatigue" visuelle au moment où le sujet commençait les tests.

La liste des questions était la suivante (entre parenthèse figure le score correspondant à la réponse) :

- 1) Actuellement avez vous les yeux qui piquent:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)
- 2) Actuellement avez vous les yeux qui pleurent:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)
- 3) Actuellement avez vous les yeux rouges:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)
- 4) Actuellement, avez vous les yeux douloureux:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)
- 5) Actuellement, avez vous les yeux secs:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)
- 6) Actuellement, avez vous les yeux fatigués:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)
- 7) Actuellement, avez vous des images troubles:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)
- 8) Actuellement, avez vous le sentiment que votre vue baisse:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)
- 9) Actuellement, avez vous des maux de tête:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)
- 10) Actuellement, avez vous des maux de nuque:
pas du tout (1) – un peu (2) – assez (3) – beaucoup (4)

A noter que les questions 9 et 10 représentent des révélateurs indirects de l'asthénopie visuelle.

Si R_i , avec i allant de 1 à 10, est le score correspondant à la réponse de la question n° i , l'indice de plainte (IP) était défini avec la formule suivante:

$$IP = \frac{2 \sum_{i=1}^8 R_i^2 + 0.5 \sum_{i=9}^{10} R_i^2}{2 \sum_{i=1}^8 R_i + 0.5 \sum_{i=9}^{10} R_i} \quad (\text{eq 3.7})$$

Cette formule qui représente une amélioration de l'indice IP utilisé initialement sur le terrain (Réf. [60], [61], [62]) était en fait une moyenne pondérée des réponses, l'indice de pondération étant de 2 pour les questions directement visuelles, et de 0.5 pour les deux autres questions. Il y avait aussi une pondération liée au score lui-même (somme des carrés de R_i rapportée à la somme des R_i). L'idée était de différencier deux situations :

- le sujet répondant "beaucoup" à une question et "pas du tout" aux 9 autres questions ;
- le sujet répondant "pas du tout" ou "un peu" aux 10 questions.

Dans le premier cas, , le sujet souffre réellement, alors que dans le deuxième cas, la souffrance est très faible. La simple moyenne arithmétique ne fait pas de différence entre les deux cas, alors que cette pondération donne de l'importance aux valeurs élevées.

3.6.2.2. Questionnaire pour l'expérience en laboratoire

Séances 1 à 8:

Le questionnaire utilisé au cours de ces séances était plus spécifiquement destiné à l'étude de la perception de l'écran et du document, soit, plus généralement, de la zone de travail. Pour chacune des 16 situations, les sujets devaient répondre pour cinq réglages de luminance de l'écran et pour un document imprimé (posé à droite du sujet) à une série de cinq questions (moins une pour le cas du document imprimé). Comme pour tous les questionnaires, les chiffres entre parenthèses donnent le score correspondant à la réponse et les lettres entre crochet, se rapportent aux noms des variables relatives à la nature des questions posées.

- 1) Vous pensez que la luminosité de l'écran (ou le document imprimé) est:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7) - [QL]
- 2) Vous pensez que cet écran (ou le document imprimé) est:
pas éblouissant(1) – un peu éblouissant(2) – éblouissant(3) – très éblouissant(4) - [QE]
- 3) Le blanc de cet écran (ou le document imprimé) vous paraît:
très froid(1) – froid (2) – un peu froid(3) – neutre(4) – un peu chaud(5) – chaud(6) – très chaud(7) - [QB]
- 4) Le contraste sur l'écran vous paraît-il:
trop faible(1) – faible(2) – bon(3) – fort(4) – trop fort(5) - [QCo]
- 5) Globalement la lumière de l'écran (ou le document imprimé) vous paraît-elle:
très agréable(1) – agréable(2) – neutre(3) - désagréable(4) -très désagréable(5) - [QC]

La question n°4 était celle qui ne concernait que l'écran. Elle n'était donc pas posée dans le cas du document imprimé.

Séance 9 :

Au cours de cette séance, seules trois questions étaient posées après chaque réglage. Elles concernaient soit l'écran, soit le document imprimé. Ces trois questions étaient les questions 1, 3 et 5 du questionnaire utilisé au cours des séances 1 à 8.

Séance 10 :

Cette séance se rapportait à l'étude de l'effet de l'entourage de l'écran sur l'éblouissement. Une série de 10 questions ont été développées pour comprendre l'éblouissement global.

- 1) La distribution vous paraît-elle:
très agréable(1) – agréable(2) – neutre(3) - désagréable(4) -très désagréable(5)
- 2) La lumière des lampes suspendues vous paraît-elle:
pas gênante(1) – un peu gênante(2) – gênante(3) - éblouissante(4) -très éblouissante(5)
- 3) La lumière du panneau lumineux à votre gauche vous paraît-elle:
pas gênante(1) – un peu gênante(2) – gênante(3) - éblouissante(4) -très éblouissante(5)

- 4) La lumière du panneau lumineux face à vous, vous paraît-elle:
pas gênante(1) – un peu gênante(2) – gênante(3) – éblouissante(4) –très éblouissante(5)
- 5) La lumière du panneau lumineux à votre droite vous paraît-elle:
pas gênante(1) – un peu gênante(2) – gênante(3) – éblouissante(4) –très éblouissante(5)
- 6) La lumière des murs vous paraît-elle:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)
- 7) Globalement la lumière vous paraît-elle:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)
- 8) Globalement quand vous lisez l'écran, cette lumière vous paraît-elle:
pas gênante(1) – un peu gênante(2) – gênante(3) – éblouissante(4) –très éblouissante(5)
- 9) La lumière de l'écran vous paraît-elle:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)
- 10) L'écran vous paraît:
très lisible(1) – lisible (2) – moyennement lisible (3) – peu lisible (4) -illisible (5)

Pour répondre aux questions de 2 à 10, les sujets devaient impérativement fixer leur regard sur l'écran.

3.6.2.3. Questionnaire pour l'expérience en local prototype

Pour les quatre situations (lumière artificielle, lumière naturelle, lumière naturelle + lumière artificielle froide et lumière naturelle + lumière artificielle chaude), les sujets devaient répondre à une série de cinq questions.

- 1) Globalement l'ambiance lumineuse vous paraît:
très froide(1) – froide(2) – un peu froide(3) – neutre(4) – un peu chaude(5) – chaude(6) – très chaude(7)
- 2) Globalement la luminosité vous paraît:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)
- 3) Vous pensez que la luminosité de l'écran est:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)
- 4) Vous pensez que la luminosité du document imprimé est:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)
- 5) Globalement vous pensez que l'ambiance lumineuse vous paraît:
pas éblouissant(1) – un peu éblouissant(2) – éblouissant(3) – très éblouissant(4)

3.6.2.4. Questionnaires pour l'expérience de suivis

Trois questionnaires étaient utilisés dans cette étude, l'un concernant l'activité de la journée du sujet, et l'autre concernant la perception visuelle.

Questionnaire relatif à l'activité

Dans le questionnaire relatif à l'activité, le sujet devait simplement estimer le pourcentage de temps qu'il avait passé au cours de la journée à réaliser différentes tâches informatisées ou non (dans le cadre de l'étude, une estimation de ces pourcentages suffisait). La liste des tâches était la suivante: saisie, interrogation, traitement de texte, programmation, CAO (conception assistée par ordinateur), contrôle de machines, lecture de documents imprimés, et autres (le sujet pouvait répondre au moyen d'un champ de saisie).

Questionnaire décrivant la situation:

Le logiciel du questionnaire permettait d'enregistrer la date et les heures précises des moments où le sujet commençait et finissait de répondre aux questions. Ensuite le sujet devait répondre aux questions suivantes:

1) Quelle est la météo actuelle ?

temps gris – soleil direct ** – ciel bleu *** – temps variable**** – nuit******

* nuageux,
** situation où le soleil pénètre à l'intérieur du local,
*** lorsque le soleil ne pénètre pas à l'intérieur du local ,
**** mélange soleil et nuages,
***** nuit: lumière artificielle

2) Si votre fenêtre a des stores en façade, sont-ils:
Entièrement fermés – entièrement ouvert – en partie ouvert

3) Si avez des stores intérieurs, sont-ils:
Entièrement fermés – entièrement ouvert – en partie ouvert

4) Est ce que la lampe sur pied (ou l'éclairage général) est:
*allumée – éteinte – en partie allumée **

* dans le cas de la lampe sur pied réglable, si elle n'est pas allumée à 100% ;
dans le cas de l'éclairage général, si les diverses rampes du local ne sont pas toutes allumées.

5) Juste avant de répondre à ces questions, quelle était le type d'activité que vous aviez :
saisie – interrogation – traitement de texte – programmation – CAO – contrôle – lecture documents imprimés – autres

Questionnaire relatif à la perception (15 questions)

6) La lumière de l'écran vous paraît-elle:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – suffisante(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)

7) Vous pensez que l'écran est:
pas éblouissant(1) – un peu éblouissant(2) – éblouissant(3) – très éblouissant(4)

- 8) Le blanc de l'écran vous paraît:
très froid(1) – froid (2) – un peu froid(3) – neutre(4) – un peu chaud(5) – chaud(6) – très chaud(7)
- 9) Le contraste sur l'écran vous paraît:
trop faible(1) – faible (2) – bon(3) – fort(4) – trop fort(5)
- 10) Globalement la lumière de l'écran vous paraît-elle:
très agréable(1) – agréable(2) – neutre(3) - désagréable(4) -très désagréable(5)
- 11) Y-a-t-il un reflet sur l'écran:
Oui(1) – Non (0)
- 12) Ce reflet vous gêne-t-il:
pas du tout(1) – un peu(2) – assez(3) – beaucoup(4)
- 13) La lumière de la feuille (à votre droite) vous paraît-elle:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – suffisante(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)
- 14) Vous pensez que cette feuille est:
pas éblouissante(1) – un peu éblouissante(2) – éblouissante(3) – très éblouissante(4)
- 15) Le blanc de cette feuille vous paraît:
très froid(1) – froid (2) – un peu froid(3) – neutre(4) – un peu chaud(5) – chaud(6) – très chaud(7)
- 16) Globalement la lumière de la feuille vous paraît-elle:
très agréable(1) – agréable(2) – neutre(3) - désagréable(4) -très désagréable(5)
- 17) La lumière artificielle * utilisée vous paraît-elle :
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – suffisante(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)
- 18) Vous pensez que cette lumière artificielle est:
pas éblouissante(1) – un peu éblouissante(2) – éblouissante(3) – très éblouissante(4)
- 19) La lumière artificielle vous paraît-elle:
très froide(1) – froide (2) – un peu froide(3) – neutre(4) – un peu chaude(5) – chaude(6) – très chaude(7)
- 20) Globalement la lumière artificielle vous paraît-elle:
très agréable(1) – agréable(2) – neutre(3) - désagréable(4) -très désagréable(5)

* la lumière artificielle était soit celle de la lampe sur pied, soit celle des luminaires du plafond, suivant quel éclairage le sujet utilisait (voir paragraphe V-4.2).

3.6.3. Test sur écran

3.6.3.1. Préambule

La procédure classique de mesure de l'acuité consiste à présenter au sujet, en vision libre ou au travers de l'oculaire d'un appareil, à une distance fixée, une planche d'optotypes, soit une surface remplie d'une grille de caractères standards, dont la taille décroît d'une ligne à l'autre. L'opérateur demande au sujet de reconnaître tous ces caractères, des plus grands aux plus petits, jusqu'à ce que ce dernier ne puisse plus les reconnaître. La dernière ligne de caractères reconnus correspond à l'acuité du sujet. Il existe de multiples types de caractères dont un seul est actuellement standardisé, à savoir, l'anneau de Landolt

(annexe A-3.2.1), anneau brisé dont il faut indiquer l'orientation de la brisure: le test du C45 et le test TITMUS utilisent cet optotype. Les autres optotypes couramment utilisés et choisis pour des raisons pratiques ou techniques sont la lettre E (qu'on oriente dans les 4 directions pour les sujets ne sachant pas lire) et les damiers pour la clinique et les études théoriques de la "Fonction de Transfert de Modulation" (MTF). Le crochet de Snellen (voir figure 3.34), ancien symbole standardisé, n'est plus utilisé. Nous l'avons cependant retenu à cause son adéquation pour l'étude de l'acuité sur un écran.

L'inconvénient de ce protocole de mesure de l'acuité est qu'il est limité à la plus petite taille de caractère qu'il est possible de présenter. Cette taille limite correspond le plus souvent à des valeurs d'acuité de l'ordre de 10 à 15 dixièmes, ce qui est loin des limites du pouvoir séparateur maximum de l'œil humain qui peut atteindre, pour des sujets jeunes et sans problème oculaire, 20 à 25 dixièmes selon le test. Un autre inconvénient de la méthode est qu'il est difficile d'illuminer de manière homogène et contrôlée ces planches ou le fond du test dans un appareil. Enfin, peu de ces tests permettent d'étudier l'effet du contraste sur l'acuité.

C'est pour toutes ces raisons que nous avons élaboré deux nouveaux tests d'acuité, dont l'un se fait sur l'écran du PC et l'autre sur table lumineuse.

3.6.3.2. Présentation du test sur écran

L'écran d'ordinateur n'ayant pas une résolution suffisante, on ne peut donc présenter des caractères d'une taille suffisamment petite pour se rapprocher de l'acuité réelle de la plupart des sujets. Pour contourner cette difficulté, une procédure différente, fondée sur les propriétés du pouvoir séparateur, a été mise au point pour estimer l'acuité. Cette procédure consiste à établir un seuil de contraste pour des caractères de tailles différentes : le sujet se sert des touches + ou -, ou des boutons de la souris pour faire varier le contraste, puis il se sert des flèches sur le pavé numérique pour désigner l'orientation du crochet de Snellen qu'il a perçu. Le seuil de contraste est établi 4 fois pour chaque taille. Reliées entre elles, les valeurs de contraste forment une *courbe acuité – contraste* (voir figure 3.34) dont la modélisation est donnée par l'équation (2.26) rappelée ici :

$$\text{Ln}[C] = \text{Ln}[C_0] \left(1 - \frac{A}{A_m} \right) \quad (\text{eq 3.8})$$

avec (Co) le contraste seuil et (Am) l'acuité, valeur que l'on cherche à estimer.

Le type de contraste (caractères noirs sur fond blanc ou le contraire, ou encore des contrastes colorés) est à fixer.

L'optotype présenté est le crochet de Snellen, qui est un simple U orienté dans les 4 directions (voir figure 3.34). Celui-ci a l'avantage sur tout autre optotype d'être adapté à la "pixelisation" de l'écran (les pixels, de formes plus ou moins carrée, sont les plus petites unités susceptibles d'être illuminées).



Figure 3.34 Crochets de Snellen dont la hauteur (d) vaut trois fois la largeur de la césure (c).

Pour chaque taille du crochet on peut calculer l'acuité, correspondante par la formule 3.9

$$A = \frac{\pi}{10800 \text{atg} \left[\frac{c}{2D} \right]} \quad (\text{eq 3.9})$$

avec c, la distance critique qui permet de reconnaître l'orientation du crochet et D, la distance entre l'optotype et l'œil du sujet.

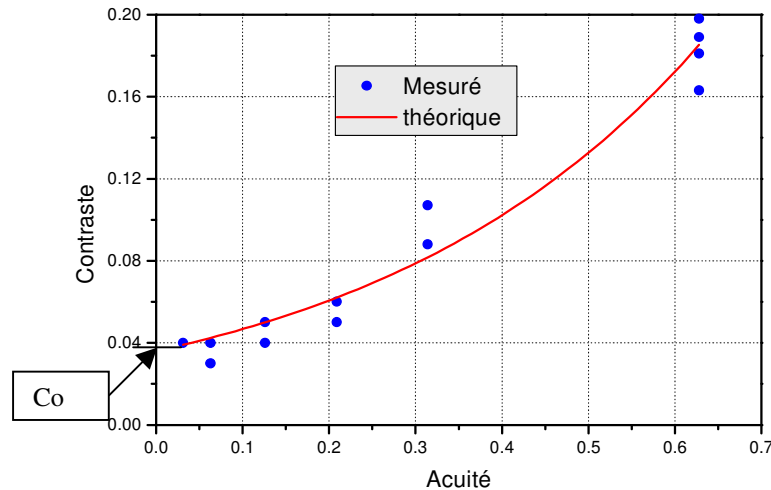


Figure 3.35 Exemple typique de courbe "acuité – contraste", pour un sujet, obtenue avec le test. Am et Co, les deux paramètres de la courbe modélisée (Am correspond à l'acuité pour un contraste de 100%). Pour cet exemple Am calculé vaut 1.28.

3.6.3.3. Calibrage du contraste

Pour créer un contraste entre le caractère et le fond, il suffisait d'affecter au caractère une couleur différente de celle du fond. La couleur du fond était fixée au blanc le plus lumineux (R=255, V=255 et B=255). La couleur du caractère était un gris défini par l'égalité R = V = B = ton de gris (G) avec une valeur allant de 0 à 255 bits (0 correspondant au noir et 255 au blanc). La luminance du gris décroissant avec ton, il fallait donc déterminer quelle était la correspondance entre la luminance (et donc le contraste) et le ton de gris, sachant que cette relation dépendait aussi du réglage, en contraste et luminosité, de l'écran. L'écran utilisé permettait un réglage numérique précis, avec des valeurs relatives allant de 0 à 100, ce qui nous donnait l'avantage de fixer une luminance d'écran avec une précision suffisante.

Le calibrage des luminances a été programmé dans le logiciel même. La procédure a consisté à mesurer la luminance d'une petite zone de l'écran (de 100 pixels de côté), de couleur uniformément grise en faisant varier le ton de 20 en 20 jusqu'à atteindre 240 puis 255 bits). Afin d'éviter les problèmes de reflets, les mesures se faisaient dans le noir, sans aucun autre apport de lumière que celui de l'écran lui-même. Une fonction mathématique représentait particulièrement bien la relation "luminance (L) – ton de gris (G)":

$$L(G) = L_0 + \left(\frac{G}{G_0} \right)^\lambda \quad (\text{eq 3.10})$$

La luminance L_0 mesurée pour un ton de gris nul (noir) n'est jamais nulle, car elle dépend du réglage de contraste.

Soit la définition usuelle du contraste: $C = \frac{L_{\text{fond}} - L_{\text{caractère}}}{L_{\text{fond}}}$

Sachant que L_{fond} est la luminance du fond pour un ton de gris valant 255, il est possible de simplifier l'équation de la luminance:

$$L(G) = L_0 + (L_{\text{fond}} - L_0) \left(\frac{G}{255} \right)^\lambda \quad (\text{eq 3.11.})$$

En terme de contraste, on obtient finalement la relation suivante:

$$C(G) = \frac{L_{\text{fond}} - L_0}{L_{\text{fond}}} \left(1 - \left(\frac{G}{255} \right)^\lambda \right) = C_{\text{max}} \left(1 - \left(\frac{G}{255} \right)^\lambda \right) \quad (\text{eq 3.12})$$

C_{max} étant le contraste maximal que l'écran peut afficher avec les réglages fixés. La figure suivante (3.35) montre le calibrage de cinq réglages différents d'écran.

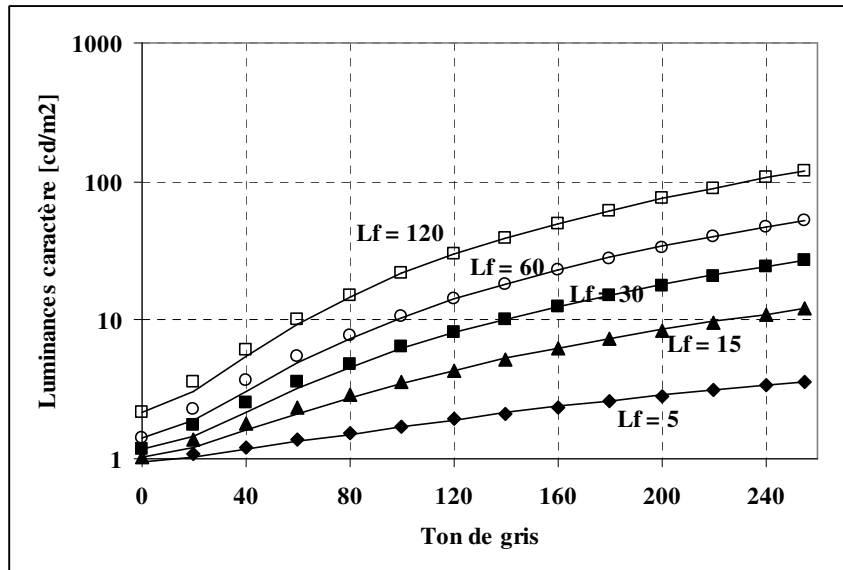


Figure 3.36 Courbes de calibration "luminances – tons de gris" pour les 5 réglages d'écran utilisés lors de l'expérience en laboratoire. Les courbes correspondent au modèle décrit par l'équation 3.11.

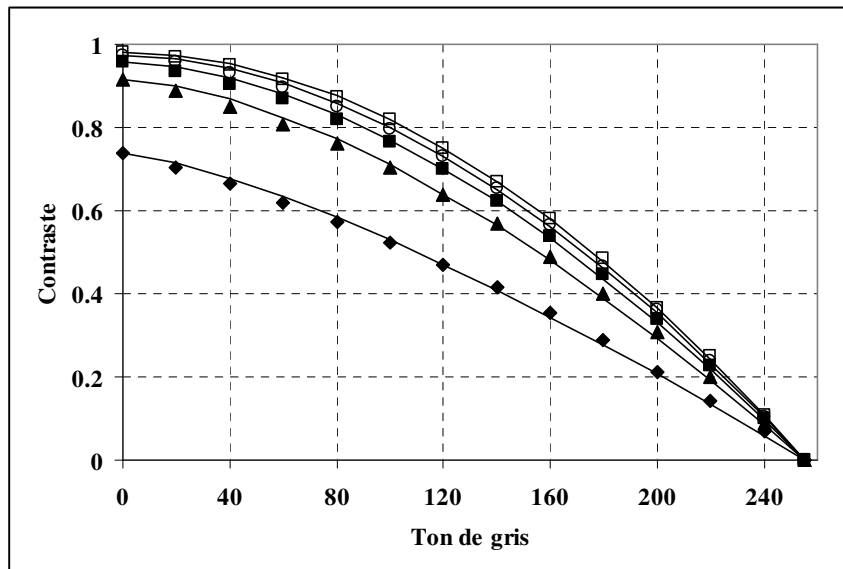


Figure 3.37 Courbes de calibration "contrastes – tons de gris" pour les réglages d'écrans. les symboles dans ce graphique correspondent aux mêmes réglages d'écran que pour la courbe des luminances (figure 3.36).

La figure 3.37 illustre un aspect important du test, à savoir, les différences de variations du contraste en fonction des réglages. En effet, chaque fois que le sujet tape sur la touche (–) pour diminuer la luminance du caractère, il fait un pas de contraste et, comme le montre la figure 3.37, ce pas change en fonction du réglage, ce qui a une incidence sur la vitesse du changement de contraste: plus le pas grandit, plus la vitesse de variation du contraste augmente. Il en résulte une augmentation des erreurs du sujet, celui-ci pouvant aller trop vite. C'est pourquoi, le logiciel a été programmé en sorte d'assurer la constance de la vitesse de variation du contraste quel que soit le réglage de l'écran.

Remarque

La question se posait de savoir si des pas de contraste trop grands pouvaient induire une incertitude sur l'évaluation du seuil de perception du contraste. En fait, de nombreuses expériences préalables ont montré que ce n'était jamais le cas. En effet, les seuils de contraste correspondant aux caractères les plus grands ont varié globalement de 0.015 à

0.07, alors que le pas de contraste variait, lui, entre moins de 0.0001 et 0.007 (voir figure 3.37).

Ces mesures de calibrage ayant eu lieu dans le noir, il était facile de généraliser les formules dans le cas général où l'écran reçoit de la lumière. Ici, il ne s'agissait que de reflets diffus, car, tout au long des expériences, les reflets spéculaires étaient évités. Soit L_R , la luminance réfléchie par l'écran que l'on l'introduit dans les équations. Cela donne:

$$L(G) = L_R + L_0 + \left(\frac{G}{G_0}\right)^\lambda \quad (\text{eq 3.13})$$

A partir de cette formule, la courbe "luminance - ton de gris" est définie en toute situation.

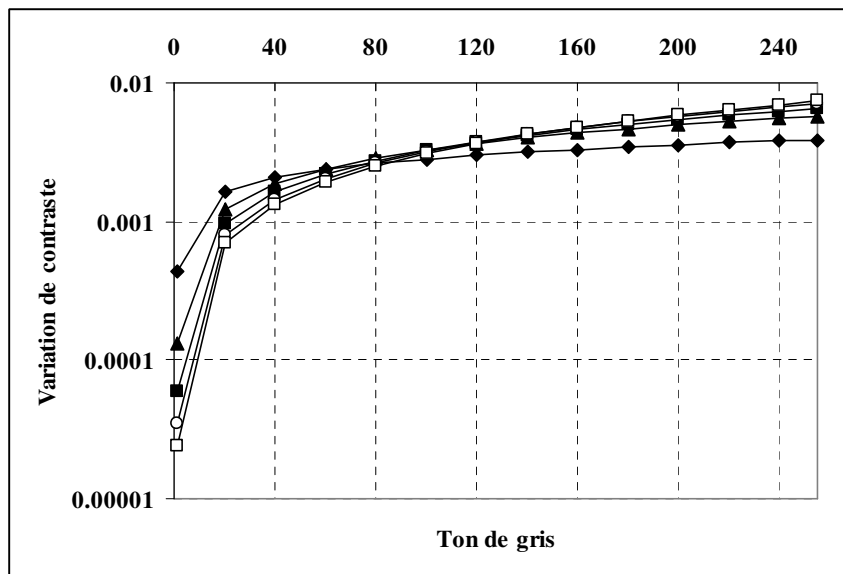


Figure 3.38 Variation de contraste pour les différents réglages d'écran. La variation de contraste est définie comme suit: $\Delta C = C(G) - C(G - 1)$.

3.6.4. Test sur table lumineuse

3.6.4.1. Conception de la table lumineuse

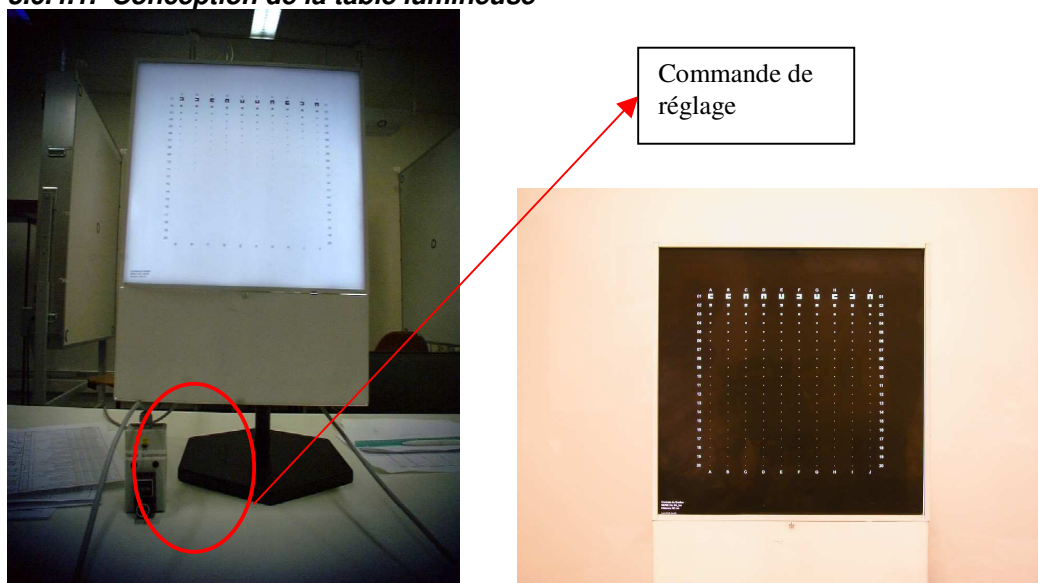


Figure 3.39 Table lumineuse avec planche de test. Sur la photo de gauche, la présentation correspond au contraste positif (fond blanc) ; sur la photo de droite, le contraste est négatif (fond noir).

Cette table se présentait comme une boîte dans laquelle étaient disposées trois lampes avec ballast électronique à hautes fréquences, permettant ainsi leur réglage. La stabilité du niveau lumineux était garantie par un circuit conçu à cet effet par le LESO. Sur la face avant de la boîte était disposée une plaque en plexiglas diffusante d'une surface de 30 x 30 cm. La surface lumineuse ainsi obtenue était d'une excellente homogénéité, la luminance minimale valant moins de 1% de la luminance maximale. Les planches de test, constituées par une feuille d'acétate transparente sur laquelle ont été flashé les optotypes (en positif ou en négatifs), étaient insérées dans un cadre permettant leur maintien sur la surface diffusante. Un emplacement était réservé pour insérer les filtres neutres servant à changer la dynamique de luminance de la table.

3.6.4.2. Calibrage de la table lumineuse

La luminosité de la table lumineuse était réglée par l'intermédiaire d'une commande (voir figure 3.40) possédant une graduation variant de 0 à 1000. Il fallait donc déterminer la relation entre cette graduation et la luminance.

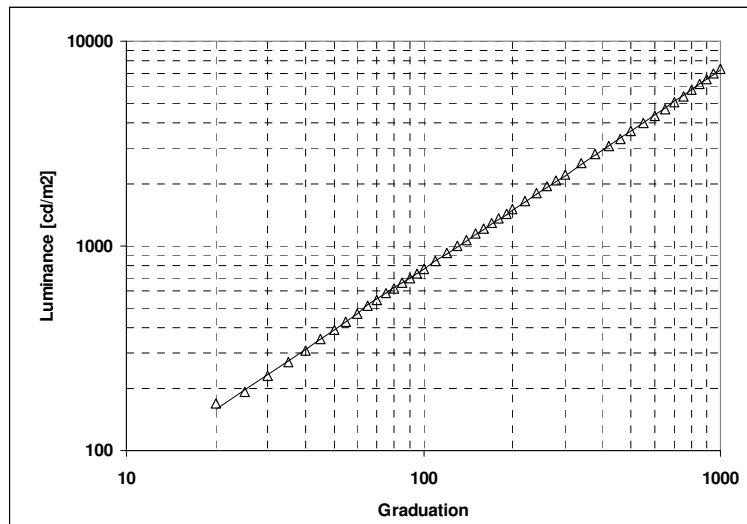


Figure 3.40 Courbe de calibrage de la luminance en fonction de la graduation de la commande.

La figure 3.40 montre la très bonne relation linéaire entre luminance et graduation ainsi que la grande dynamique de la luminance, celle-ci pouvant varier entre environ 170 cd/m^2 et 7400 cd/m^2 . Toutefois, nous devons également disposer de luminances relativement basses. L'adjonction d'un filtre d'environ 3% de transmittance lumineuse nous permettrait d'obtenir une luminance minimum d'environ 5 cd/m^2 .

3.6.4.3. Optotypes

Les optotypes ont été imprimés par "flashage" sur des planches de film transparent, de dimension 30 x 20 cm, avec une résolution de 3000 dpi. Ainsi, sur chaque planche, figurait une matrice de 20 x 10 crochets de Snellen, soit 20 lignes de 10 crochets orientés différemment, correspondant à des acuités allant de 1 à 20 dixièmes pour une distance de vision de 60 cm (les lignes représentant les acuités). Pour éviter les effets de mémorisation, nous disposons de huit planches qui se distinguaient par l'ordre de présentation des crochets, quatre en contraste positif (caractère noir sur fond blanc) et quatre en contraste négatif.

3.6.4.4. Procédure du test

La procédure adoptée correspond à celle qui est couramment utilisée pour la détermination de l'acuité.

Si un sujet possède une meilleure acuité que celle correspondant à la ligne qu'il lit, il en reconnaîtra les 10 caractères. De même, si son acuité est inférieure, il n'en reconnaîtra aucun. Mais, si son acuité est proche, il ne reconnaîtra qu'un certain pourcentage de ces 10 caractères. Le principe de ce test est de déterminer la courbe "pourcentage de réussite (p) – acuité" et d'estimer l'acuité du sujet comme étant celle pour laquelle p vaut 50%, ceci par définition de la notion du seuil. La figure 3.41, montre un exemple de courbe.

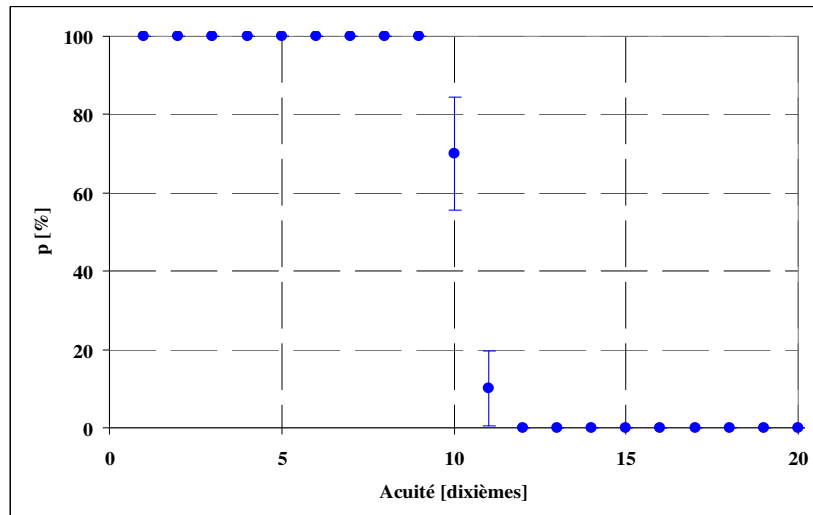


Figure 3.41 Exemple typique de courbe "pourcentage d'erreur -a cuité". L'acuité seuil obtenue ici est d'environ 10 dixième.

D'après cette courbe, il apparaît que seules les 3 ou 4 lignes correspondant à une acuité proche de celle du sujet sont déterminantes. Il importait donc que la procédure de test permette de s'en approcher le plus rapidement possible, afin d'éviter au sujet de devoir lire les 20 crochets de la planche. C'est la méthode dite "clinique concentrique" de détermination des seuils. L'opérateur donnait ainsi la consigne au sujet d'aller directement à la dernière ligne qu'il pensait pouvoir lire facilement. Cette consigne s'est avérée nécessaire pour minimiser le temps de test.

3.6.5. Photoluminancemètre numérique

3.6.5.1 Présentation de l'appareillage

L'élément de base du photoluminancemètre numérique est un appareil photonumérique Nikon E3 muni d'un objectif "fish-eye" 8 mm donnant une image de 180° en coordonnées sphériques. Cet appareil a été choisi pour deux raisons: premièrement, il était le seul qui permettait l'utilisation d'un tel objectif sans perte de qualité ; deuxièmement l'angle d'ouverture de l'objectif fish-eye, permettait de photographier le champ visuel complet. L'objectif fish-eye donnant des images de forme ronde, une partie de la photo (en noir sur la figure 3.42) est inutilisable. Le traitement des images, nécessite donc de les tronquer au préalable. Il en résulte que la résolution initiale des images qui est de 1280 x 1000 pixels, se réduit à 950 x 950 pixels, ce qui représente l'espace exact de la vraie image.

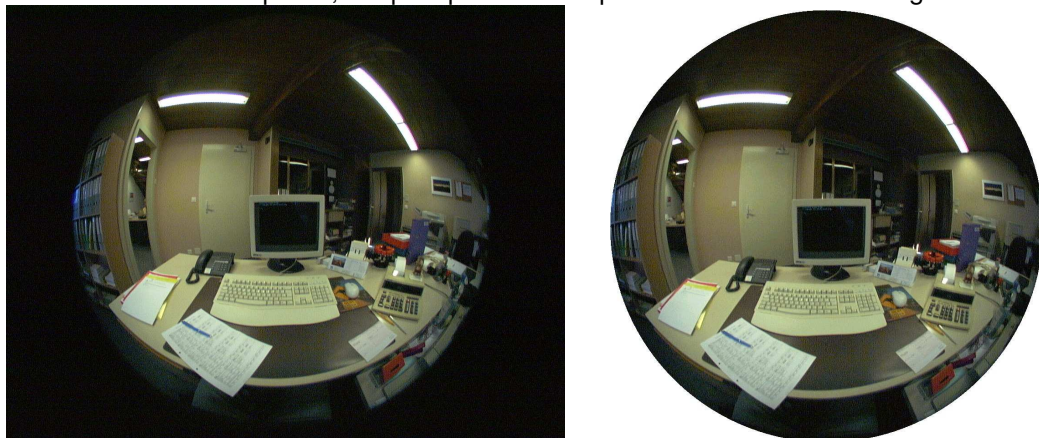


Figure 3.42 Photo de gauche : image de 1280 x 1000 pixels obtenue en partie noire cause de l'objectif fish-eye. Photo de droite : image de 950 x 950 pixels obtenue après rognage.

3.6.5.2. Calibrage

Pour transformer cet appareil photonumérique en un véritable photomètre, il fallait procéder à deux types de calibrages: le calibrage spatiale (relation entre pixels et leur localisation dans l'espace réel) et le calibrage photométrique (relation entre couleurs des pixels et leur luminance réelle).

A) Calibrage spatial

Ce calibrage avait pour but de déterminer une relation entre la localisation des pixels de la photographie et leur position équivalente dans le champ correspondant, celle-ci se présentant sous la forme de deux angles de repérage (σ, τ), voir figure 3.43. L'angle σ représente la distance angulaire entre le point visé et l'axe du regard (centre de la photographie).

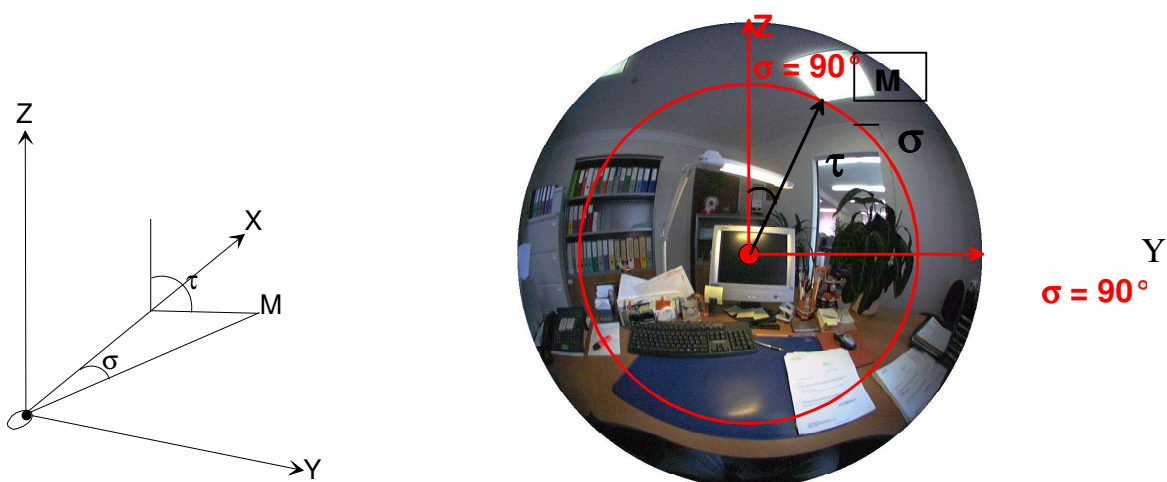


Figure 3.43 *Image de gauche*: angles (σ, τ) de repérage d'un point M quelconque du champ visuel. L'axe X représente l'axe du regard.
Image de droite : les mêmes angles projetés sur une photographie fish-eye (sur la photographie le point M correspond à un coin de la lampe au plafond).

On voit sur la photographie que l'angle σ est lié à la distance entre le point M à repérer et le centre de l'image (c'est l'angle visuel des ophtalmologues), quant à l'angle τ , il correspond directement à l'angle par rapport à l'axe Z.

Calibrage de l'angle σ :

Le calibrage s'est fait à l'aide d'un périmètre Oculus (outil servant à l'ophtalmologue pour mesurer le champ visuel). On photographie l'outil (voir figure 3.44) après avoir disposé des repères, visibles sur la photo, tous les 10 degrés.

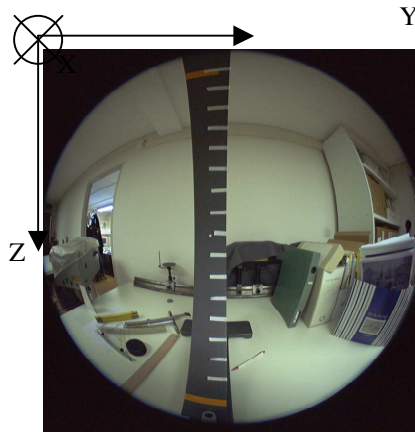


Figure 3.44 Photographie réalisée pour le calibrage de l'angle σ . Les marques blanches correspondent aux graduations, tous les 10 degrés. Les axes Y et Z de la figure 3.43 sont notés sur cette photographie, l'axe X est l'axe du regard.

Soient y et z les coordonnées, en pixels, du point visé et

$d = \sqrt{(y - 475)^2 + (z - 475)^2}$ la distance entre ce point et le centre de la photographie (axe du regard). Le point (0,0) est le point en haut à gauche de la photographie. A noter que le point (475, 475), que l'on trouve dans la formule de d , représente le centre de la photographie. On a pu montrer que l'angle σ était déterminé par la formule suivante:

$$\sigma \approx \left| \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha d(y,z)}}{2\alpha} \right| \quad (\text{eq 3.14})$$

avec: $\begin{cases} \beta \approx 5.78 \\ \alpha \approx 0.0054 \end{cases}$. A noter que σ est calculé ici en degrés.

Calibrage angle τ :

Comme nous voyons sur la figure 3.43, l'angle τ correspond exactement à l'angle (τ) inscrit sur la photographie (3.43, image de droite). L'angle τ est relié aux valeurs Y et Z par la formule trigonométrique suivante :

$$\text{tg}(\tau) = \frac{Y - 475}{Z - 475} \quad (\text{eq 3.15})$$

Les formules 3.14 et 3.15 permettent donc de déterminer les angles de repérages d'un point du champ visuel, à partir des coordonnées Y et Z dans la photographie numérique (coordonnées en de nombres de pixels) du pixel correspondant à ce point.

B) Calibrage photométrique:

la photographie numérique est basée sur le principe de la transformation de la lumière incidente qualifiée par sa couleur et son intensité en trois valeurs numériques, R (rouge), V (vert), B (bleu). Chaque pixel de l'image est donc caractérisé par ces 3 valeurs qui chacune varient entre 0 et 255. Le but du calibrage est alors de déterminer la relation entre la luminance réelle et les valeurs (R, V, B), en tenant compte du problème de la saturation due à la limite de 255 pour les valeurs de R, V, B. Deux paramètres peuvent être réglés manuellement sur l'appareil photo. Ce sont la vitesse d'obturation (V_0) et l'ouverture (O) du

diaphragme qui permettent de faire varier l'exposition de la photographie et donc le niveau de saturation.

Utilisant cette propriété, plusieurs photographies d'une cible (voir figure 3.45), dont les couleurs et les luminances étaient connues, ont été prises, en faisant varier les paramètres V_0 et O . Cette cible était un film transparent sur lequel étaient imprimées 6 couleurs de base (rouge, vert, bleu, jaune, cyan et gris). Ce film était placé sur la table lumineuse décrite plus haut (voir figure 3.45) dont la luminance pouvait varier de 1 cd/m^2 à 7000 cd/m^2 . Les 6 plages lumineuses, avaient été qualifiées en terme de luminance et de coordonnées trichromatiques avec un luminancemètre- chromamètre Minolta CS-100 calibré dont l'angle d'ouverture était de 1° .

Pour avoir l'équivalent en tons de R, V et B sur la photographie de ces points mesurés, le logiciel utilisé permettait de faire une moyenne des R, V, B dans une zone de 0.5° autour du point mesuré.

Les 17 valeurs possibles de V_0 étaient : 8, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 180, 250, 350, 500, 750, 1000, 1500 et 2000.

Les 13 valeurs possibles de O étaient : 4.8, 5.6, 6.7, 8, 9.5, 11, 13, 16, 19, 22, 27, 32 et 36.

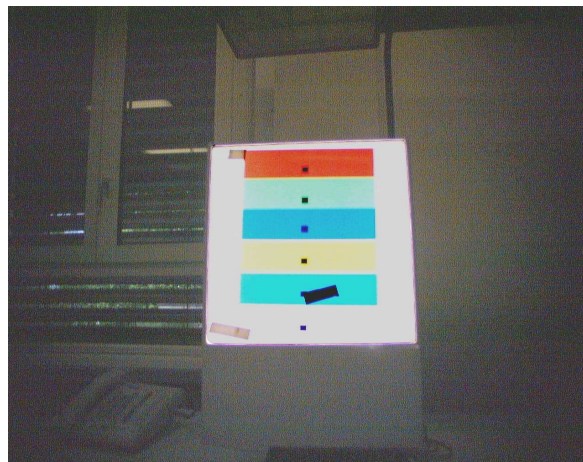


Figure 3.45 Photographie de la cible colorée, les petits carrés noirs correspondent aux repères permettant de mesurer les luminances et les coordonnées trichromatiques (on vise juste au-dessus du repère) de chaque zone colorée.

Lors du calibrage nous avons constaté un phénomène d'assombrissement dans les bords de la photographie (au-delà de 60°). Pour corriger cet effet, une série de photographies ont été réalisées en visant une cible (de luminance connue) avec un angle de visée variable. Les figures 3.45, 3.46 et 3.47 montrent le résultat de cette phase de mesure.

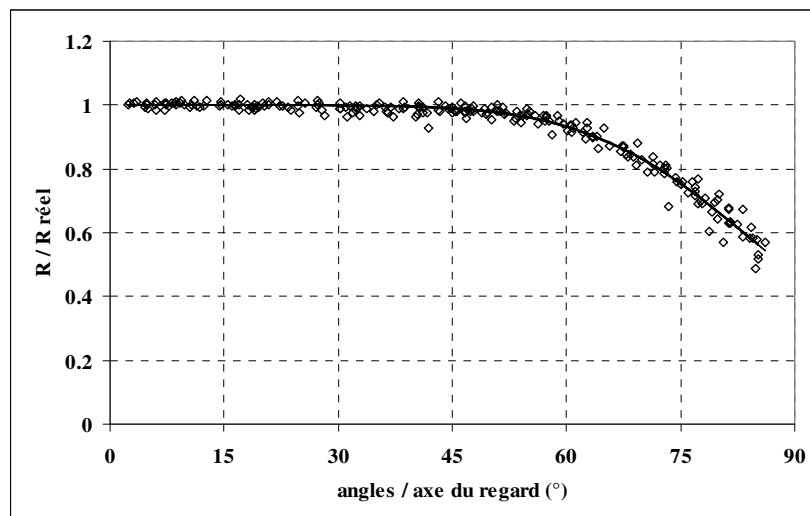


Figure 3.46 Calibrage de l'assombrissement pour le canal rouge.

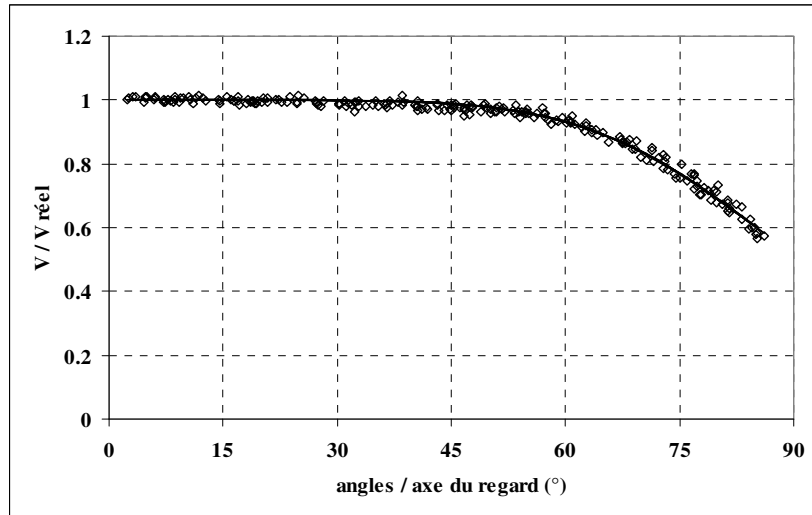


Figure 3.47 Calibrage de l'assombrissement pour le canal vert.

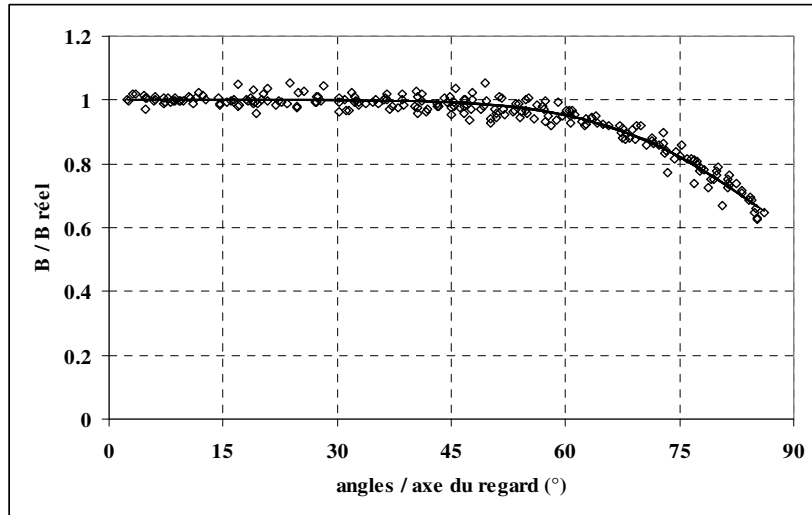


Figure 3.48 Calibrage de l'assombrissement pour le canal bleu.

Les figures 3.45 à 3.47 mettent bien en évidence l'assombrissement au-delà de 60°. Les courbes en trait plein correspondent au modèle permettant de corriger ce phénomène. La correction se fait selon l'équation 3.16:

$$\begin{cases} R_C \approx R \left(1 + \left(\frac{\sigma}{88.42} \right)^{6.8} \right) \\ V_C \approx V \left(1 + \left(\frac{\sigma}{90.75} \right)^{6.34} \right) \\ B_C \approx B \left(1 + \left(\frac{\sigma}{94.52} \right)^{6.63} \right) \end{cases} \quad (\text{eq 3.16})$$

Avec (R, V, B) les trois couleurs non corrigées, (R_C, V_C, B_C) les couleurs corrigées et σ la distance angulaire, en degrés, entre le point visé et l'axe du regard (centre de la photographie).

En ce qui concerne les luminances, nous avons pu établir l'équation suivante (voir la figure 3.49) :

$$L \approx \frac{1}{1600000} G^2 V_0 O^2 \quad (\text{eq 3.17})$$

avec G (représentant le gris) $G \approx 0.64R + 0.37V - 0.01B$

Les coefficients devant R, V et B ont été déterminés aussi par la méthode de fit non-linéaires.

A noter que le signe négatif devant B vient du fait que le spectre du rouge de l'écran possède, outre son pic principal dans le rouge, un pic secondaire dans le bleu. Il y a donc une redondance dans l'information répercutée dans le coefficient devant B.

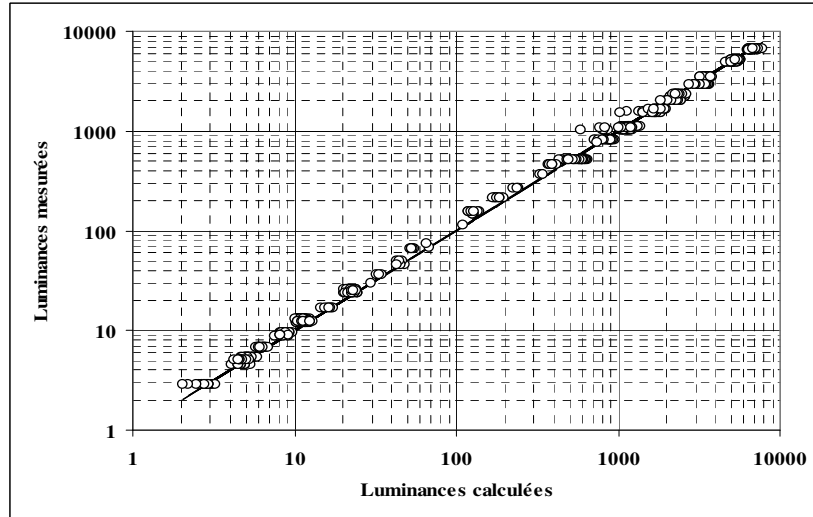


Figure 3.49 Calibrage des luminances: comparaison entre la luminance réelle mesurée par un photomètre calibré et la luminance calculée au moyen de l'équation 3.17.

La corrélation étant de 0.99 et l'erreur moyenne de 9% (erreur suffisante pour l'étude du confort visuel), il était alors démontré que la mesure de luminances était possible par cette méthode.

Toutefois, l'échelle des tons de gris (G) étant limité à 255 pas, il fallait tenir compte des zones de saturation sur la photographie dans lesquelles toute mesure de luminance est impossible. Ces zones correspondant aux principales sources de lumière, il était important de pouvoir les mesurer. La solution a consisté à faire un certain nombre de photographies aux réglages prédéfinis permettant de mesurer une dynamique suffisante de luminances. En procédant à 7 réglages de l'appareil, il était possible de couvrir un intervalle de luminance situé entre 0.05 cd/m² et 78408 cd/m² (voir tableau 3.5). Il est à noter qu'il est impératif de faire les 7 photographies de la même scène en bougeant le moins possible, ce qui implique l'utilisation d'un pied photométrique.

Réglages	V ₀	O	L minimum	L maximum
1	8	4.8	0.05	5.6
2	20	8	0.3	39
3	90	11	2.7	329
4	250	13	11	1278
5	500	16	32	3872
6	1000	22	121	14641
7	2000	36	648	78408

Tableau 3.5 Relation entre 7 réglages de l'appareil photonumérique et les intervalles de luminances garantissant une mesure optimale, sans effets de saturation dans les zones des champs visuels photographiés.

3.6.5.3. Procédure de mesures photométriques

Dans un premier temps, deux paramètres photométriques de base peuvent être mesurés avec l'appareil: la luminance d'un point quelconque du champ visuel et l'éclairement vertical au niveau des yeux. Ensuite, dans un deuxième temps, un certain nombre d'autres paramètres photométriques plus complexes peuvent être estimés, tels que les éclairagements directs, indirects, pupillaires et l'indice UGR .

A) Luminances

Le logiciel développé permettait de définir un angle d'ouverture comme pour un luminancemètre quelconque. Il était toutefois nécessaire de ne pas prendre un angle trop petit, la limite étant de 1°. En effet, si la zone photographique correspondante est composée d'un nombre trop faible de pixels, cela peut engendrer d'importantes erreurs. Pour avoir un ordre d'idée, une zone de 1° est composée en moyenne d'approximativement 25 pixels (nombre variant en fonction de l'emplacement sur la photographie).

Quand on clique au niveau du point de la photographie dont on désire connaître la luminance, le logiciel calcule automatiquement les valeurs R, V, B moyennes (moyenne effectuée dans la zone située à moins de δ° - angle d'ouverture - autour du point mesuré). On procède au même calcul pour les 7 photographies correspondantes aux 7 réglages définis dans le tableau 3.5.

Soient les valeurs moyennes $(\bar{R}_i, \bar{V}_i, \bar{B}_i)$ calculées pour le réglage n^oi, i allant de 1 à 7. D'une manière générale, si on utilise les réglages prédéfinis (cf. tableau 3.5) les photographies obtenues vont de la plus claire et saturée (réglage n^o1) à la plus sombre (réglage n^o7). Il y a donc deux saturations: quand les tons de couleurs sont bloqués à 255 ou quand ils sont bloqués à 0. Dans les deux cas il est impératif de l'éviter et il en va de même si une seule des trois couleurs R, V et B est saturée. En fait, pour déterminer la luminance, on choisit le réglage tel que $\bar{G}_i = 0.64\bar{R}_i + 0.37\bar{V}_i - 0.01\bar{B}_i$ (équation 3.17) soit le plus proche de 125 (milieu de l'échelle des tons de gris), avec aucune des valeurs \bar{R}_i, \bar{V}_i et \bar{B}_i saturées, puis on applique l'équation 3.17.

B) Eclairement vertical au niveau des yeux

L'éclairement est définis par la formule suivante: $E = \iint L d\Omega = \iint L(\sigma, \tau) \sin(\sigma) \cos(\sigma) d\sigma d\tau$, σ, τ étant les angles définis au paragraphe § A-3.2.2 (figure A). Cette formule ne peut pas s'appliquer directement dans notre cas, c'est pourquoi nous avons subdivisé la photographie en carrés de 10 pixels de côté (ce qui correspond en moyenne à un peu moins de 2° de côté). Nous avons choisi des carrés, car ils permettaient de recouvrir au maximum toute la surface de la photographie. Soient σ_{ij}, τ_{ij} les angles de repérage du carré n^oi (horizontal) et j (vertical). Les angles sont calculés à partir du centre du carré et L_{ij} , la luminance assignée à ce carré, calculée à partir de la procédure décrite au paragraphe précédent. L'éclairement total se calcule alors grâce à la formule suivante:

$$E_V = \pi \frac{\sum_i \sum_j \sin(\sigma_{ij}) \cos(\sigma_{ij}) L_{ij}}{\sum_i \sum_j \sin(\sigma_{ij}) \cos(\sigma_{ij})} = \pi \frac{\sum_i \sum_j \sin(2\sigma_{ij}) L_{ij}}{\sum_i \sum_j \sin(2\sigma_{ij})} \quad (\text{eq 3.18})$$

A noter que, la zone de la photographie correspondant au champ visuel étant de forme circulaire, il faut exclure dans ce calcul tous les carrés qui sont en dehors de celle-ci.

C) Autres paramètres photométriques

Ces calculs effectués, il devenait possible de déterminer un certain nombre de paramètres photométriques non mesurables par les outils de mesure usuels :

§ éclairements directs (partie de l'éclairément provenant directement des sources lumineuses dans le champ visuel ;

§ éclairément indirect (éclairage total – éclairéments directs) ;

§ éclairément pupillaire (partie de l'éclairément correspondant au vrai champ visuel moyen des sujets, ce dernier ne correspondant pas à la totalité des 180° que permet de photographier l'objectif fish-eye).

Pour faire le calcul de ces paramètres, il suffit de procéder au même calcul que celui décrit dans le paragraphe précédent (cf. équation 3.18), sauf que les sommations ne se font plus dans l'ensemble du champ visuel, mais dans une zone plus spécifique. Ainsi, concernant l'éclairément direct, par exemple, les lampes et fenêtres seront les zones du champ visuel sur lesquelles la sommation va se faire. La fonction correspondante est la suivante:

$$E_{\text{zone}} = \pi \frac{\sum_{i,j \in \text{zone}} \sin(2\sigma_{ij}) L_{ij}}{\sum_i \sum_j \sin(2\sigma_{ij})} \quad (\text{eq 3.19})$$

Pour que le programme reconnaisse la zone à analyser, il suffit de créer une image supplémentaire dans laquelle la zone considérée a été coloriée au préalable avec une couleur précise (bleu). Le programme fera, alors, la sommation uniquement pour les points qui auront cette couleur. Les figures 3.49 montrent des exemples de coloriages pour les calculs des éclairéments direct, indirect et pupillaire.

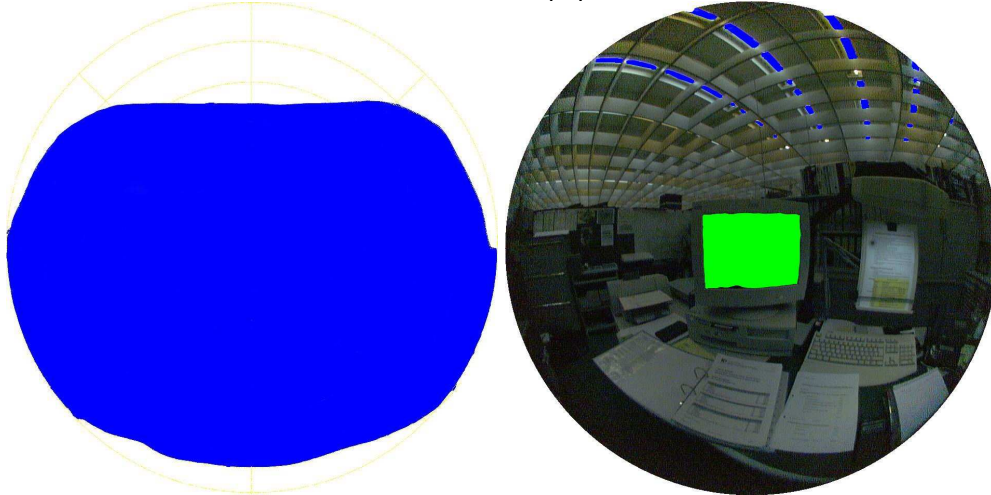


Figure 3.50 Système de coloriage des zones pour le calcul des éclairéments correspondants. Le bleu a été utilisé pour la reconnaissance de ces zones (dans la photographie de droite la zone de l'écran est marquée également). La photographie de gauche correspond aux dimensions moyennes des champ visuels réels des sujets, utilisés pour calculer l'éclairément pupillaire correspondant à l'éclairément vertical mesuré devant les yeux. Dans la photographie de droite, les zones bleues qui correspondent aux sources de lumière (lampe au plafond) vont permettre de calculer l'éclairément direct, puis l'éclairément indirect qui en est le complément.

On voit sur les figures 3.49 que les zones ainsi coloriées, se distinguent parfaitement du reste de l'image. Les couleurs choisies correspondent à des valeurs (R, V, B) bien précises (le bleu: (0,0,255) et le vert (0,255,0) que le logiciel peut facilement reconnaître.

D) L'indice d'éblouissement UGR

Connaissant les éclairagements directs et indirects, il devient possible de calculer directement divers indices d'éblouissement, entre autre, l'indice UGR proposé par la CIE. Cependant, si on reprend la formulation de cet indice, on voit qu'elle est adaptée pour le cas de sources peu étendues, voire ponctuelles. Mais quand ces sources deviennent plus étendues et inhomogènes, l'équation (2.3) ne peut plus s'appliquer telle quelle. Pour contourner cette difficulté nous avons admis l'équation suivante pour UGR:

$$UGR = 8 \operatorname{Log} \left(\frac{1}{4L_f} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{P_i^2} \right) \quad (\text{eq 3.20})$$

Dans cette formulation, la somme se fait sur l'ensemble des pixels appartenant à une source, cette dernière étant repérée sur l'image digitalisée grâce au système de coloriage décrit dans le paragraphe précédent.

3.7 Méthodes statistiques

Le travail d'analyse statistique s'est fait selon trois étapes. La première étape consistait à déterminer quels étaient les paramètres physiques et physiologiques qui influençaient le phénomène subjectif étudié. La deuxième étape consistait à modéliser les relations entre les phénomènes et les paramètres qui étaient supposés le déterminer selon les hypothèses prédéfinies.

Or le phénomène étudié n'est jamais déterminé avec précision du fait qu'il s'agissait soit de réponses subjectives à des questions, soit des acuités visuelles ou des seuils de contraste pouvant, eux aussi varier de façon importante pour un sujet. C'est pourquoi il était nécessaire de passer à une troisième étape, qui consistait à évaluer la probabilité de la réponse réelle en fonction de la réponse calculée par le modèle. Le résultat de cette étape revenait en fait à l'élaboration des indicateurs nécessaires à l'ergonomie.

La validation des indicateurs préconisés a nécessité plusieurs techniques statistiques, à savoir:

- § ajustements linéaires ou non (les phénomènes régissant la vision n'obéissent pas toujours à des lois linéaires) ;
- § comparaison de variances (test F de Fisher-Snedecor) ;
- § et aussi tests de linéarité permettant la validation d'un modèle.

3.7.1. Ajustements à plusieurs variables (deuxième phase)

3.7.1.1. Méthode des ajustements linéaires

La méthode consiste à procéder à une régression linéaire à m variables. Il faut estimer n paramètres (α_j) tels que si Y dépend de m variables X_j , on ait :

$$Y = \alpha_1(X_1 - \bar{X}_1) + \alpha_2(X_2 - \bar{X}_2) + \dots + \alpha_m(X_m - \bar{X}_m) + \bar{Y} = \sum_{j=1}^m \alpha_j(X_j - \bar{X}_j) + \bar{Y} \quad (\text{eq 3.21})$$

A noter que la barre sur un nom de variable correspond à la valeur de moyenne de cette variable. Exemple: $\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}$ = moyenne de la $j^{\text{ième}}$ variable)

On voit que l'équation ci-dessus est linéaire par rapport aux paramètres à estimer, d'où la dénomination d'ajustement linéaire. En fait les X_j peuvent être la résultante de relations quelconques, non linéaires, des variables mesurées.

Sachant que nous disposons d'un effectif de n valeurs mesurées de Y et des m variables X_j (Y_i et X_{ij}), i variant de 1 à n, il est possible d'estimer les α_j par la méthode des

moindres carrés. Cette méthode consiste à minimiser la quantité

$$C = \sum_{i=1}^n \left[Y_i - \bar{Y} - \sum_{j=1}^m \alpha_j (X_{ij} - \bar{X}_{ij}) \right]^2$$

En passant à des notations matricielles et vectorielles (α_j devenant $\bar{\alpha}$, un vecteur de n dimension), la solution est donnée par les formules suivantes:

$$\bar{\alpha} = M^{-1} \bar{V} \quad (\text{eq 3.22})$$

M étant la matrice de covariances définie comme suit:

$$M_{kj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k)(X_{ij} - \bar{X}_j), \quad k \text{ et } j \text{ variant de } 1 \text{ à } m \quad (\text{eq 3.23})$$

Et \bar{V} un vecteur de covariances défini comme suit:

$$V_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k)(Y_i - \bar{Y}) \quad (\text{eq 3.24})$$

Pour ce type de relation, il existe un outil très pratique qui permet de caractériser le degré de liaison entre la variable Y et les m autres variables. Il s'agit du coefficient de corrélation multiple R_{XY} défini comme suit:

$$R_{XY}^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - Y'_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (\text{eq 3.25})$$

Y' étant la valeur calculée de la variable Y par la formule (3.21).

A noter que cette formulation de la corrélation multiple est valable aussi dans le cas de modèles non linéaires.

Après avoir estimé les paramètres $\bar{\alpha}$, il faut évaluer aussi leur variance et écart-types, \bar{S}_{α} , et donc leur intervalle de confiance. En introduisant la matrice D comme la matrice inverse de la matrice de covariance, ces variances sont estimées par la formule suivante:

$$S_{\alpha_j}^2 = \frac{\sigma_Y^2 (1 - R_{XY}^2)}{n - m - 1} D_{jj} \quad (\text{eq 3.26})$$

σ_Y^2 est la variance totale de la variable Y (voir démonstration de la formule à l'annexe §A-1.1).

Les variances des paramètres du modèle permettent, outre le calcul de l'intervalle de confiance, de tester l'hypothèse qu'une quelconque des variables X_j a vraiment une influence sur Y. En effet si les α_j décrivent l'influence de la variable X_j sur Y, alors il va de soi que si la $k^{\text{ième}}$ valeur de ces paramètres est non significativement différente de 0, alors on peut dire que la $k^{\text{ième}}$ variable X_k n'influence pas Y. Nous savons que si les effectifs sont suffisamment importants (en général pour $n > 30$) et si l'hypothèse de nullité du

paramètre α_k supposée juste, alors la variable $t_k = \frac{|\alpha_k|}{S_{\alpha k}}$ (eq 3.27) suit une loi normale

(de centre 0 et d'écart - type 1). C'est ce qui donne la possibilité, à travers ce test, de vérifier si une variable donnée rentre réellement dans l'explication d'une autre variable.

Avec ce même procédé, Il est aussi possible de comparer des paramètres dans le cas, par exemple, où il faut vérifier que la $k^{\text{ième}}$ variable a la même influence dans deux sous-groupes, ou deux groupes différents. Le test est le même et t_k prend la forme suivante:

$$t_k = \frac{|\alpha_{1k} - \alpha_{2k}|}{\sqrt{S_{\alpha k}^2 + S_{\alpha k}^2}}, \quad \text{pour les groupes 1 et 2.}$$

Enfin, on peut faire une comparaison simultanée de α_k estimés à partir de L groupes différents:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^L \frac{(\alpha_{kj} - \bar{\alpha}_k)^2}{S_{\alpha_{kj}}^2} \quad \text{Suit une loi chi2 avec L-1 degrés de liberté.}$$

avec α_{kj} la $j^{\text{ième}}$ estimation du paramètre α_k , $S_{\alpha_{kj}}^2$, la $j^{\text{ième}}$ estimation de la variance du

$$\text{paramètre } \alpha_k. \text{ Et enfin } \bar{\alpha}_k = \frac{\sum_{j=1}^L \alpha_{kj}}{\sum_{j=1}^L 1} \quad \text{l'estimation de la moyenne du paramètre}$$

α_k avec L estimations.

3.7.1.2. Ajustements non linéaires

Dans le cas où le modèle à valider n'est pas linéaire, sa forme générale et la suivante:

$$Y = F(\bar{X}, \bar{\alpha}) \quad (\text{eq 3.28})$$

A noter qu'il existe une variante de cette forme qui peut être linéarisée:

$$Y = \sum_{j=1}^m F_j(\bar{\alpha}) X_j, \text{ les } F_j \text{ sont des fonctions non linéaires des } \alpha_j.$$

C'est typiquement le cas du modèle "acuité - contraste" (voir éq 3.8)

$$\text{Ln}(C) = \text{Ln}(C_0) - A \frac{\text{Ln}(C_0)}{A_m}, \text{ qui correspond à une fonction non linéaire par rapport aux deux}$$

paramètres A_m et C_0

On voit toutefois que l'on peut linéariser la fonction en prenant des paramètres a, b tels que $\text{Ln}(C) = a + Ab$,. Cependant les paramètres qui nous intéressent étant C_0 et A_m , il faut rester dans le domaine non linéaire.

La méthode des moindres carrés permet l'estimation des paramètres $\bar{\alpha}$, il faut donc

$$\text{minimiser la quantité: } C = \sum_{i=1}^n [Y_i - \bar{Y} - F(X_{ij}, \bar{\alpha})]^2. \text{ Contrairement au cas linéaire cette}$$

minimisation ne peut se faire par un calcul direct, il faut passer par un algorithme de calcul numérique.

L'équation de récurrence est la suivante (pour les détails des démonstrations, voir annexe équations A. 24, A.25 et A.28) : si $\bar{\alpha}_p$ est le vecteur des paramètres calculé après la $p^{\text{ième}}$ itération.

$$\bar{\alpha}_{p+1} = \bar{\alpha}_p + D(\bar{\alpha}_p) \sum_{i=1}^n \frac{\partial F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)}{\partial \bar{\alpha}} [Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)] \quad (\text{eq 3.29})$$

avec

$D(\bar{\alpha})$ la matrice inverse de la matrice $M(\bar{\alpha})$ définie comme suit:

$$M_{jk}(\bar{\alpha}) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial^2 F(\bar{X}_i, \bar{\alpha})}{\partial \alpha_j \partial \alpha_k} (Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha})) - \frac{\partial F(\bar{X}_i, \bar{\alpha})}{\partial \alpha_j} \frac{\partial F(\bar{X}_i, \bar{\alpha})}{\partial \alpha_k} \right\} \quad (\text{eq 3.30})$$

et pour la variance des paramètres:

$$\bar{S}(\bar{\alpha}_{p+1}) = \frac{\bar{D}(\bar{\alpha}_p) \sum_{i=1}^n (Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_{p+1}))}{n(n - np - 1)} \quad (\text{eq 3.31})$$

3.7.2. Test de linéarité (test de validation d'un modèle, troisième phase)

L'opération consiste à valider un modèle, ou à comparer différents modèles. Il existe un test, dit test de linéarité, qui permet de déterminer si l'hypothèse d'une liaison linéaire est acceptable ou non. Ce test peut être appliqué au cas général non-linéaire en comparant la variable mesurée et son équivalent calculé par le modèle.

Commençons par le cas avec une seule variable (X). Le plan d'expérience est alors défini par une série de k valeurs de X : X_i . Pour chacune de ces k valeurs, on mesure n_i fois la variable Y: Y_{ij} (j allant de 1 à n_i). Soient \bar{Y}_i la série des moyennes des Y_{ij} et σ_i^2 les variances correspondantes, n le nombre total de mesures ($n = \sum_{i=1}^k n_i$), S_A^2 l'estimation de la variance intra-individuelle et S_Y^2 la variance résiduelle de la liaison linéaire $\bar{Y}(X)$.

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}, \quad \sigma_i^2 = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2, \quad S_A^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^n n_i \sigma_i^2 \quad \text{et} \quad S_Y^2 = \frac{n}{k-2} \sigma_Y^2 (1 - R_{X\bar{Y}}^2) \quad (\text{eq 3.32})$$

σ_Y^2 est la variance totale de \bar{Y} définie comme suit: $\sigma_Y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2$ et $R_{X\bar{Y}}$ la corrélation entre les variables X et \bar{Y} définie comme suit: $R_{X\bar{Y}} = \frac{C_{X\bar{Y}}}{\sigma_X \sigma_{\bar{Y}}}$.

A noter que n-k est le nombre de degrés de liberté pour l'estimation de la variance intra-individuelle et k-2 est le nombre de degrés de liberté pour l'estimation de la variance résiduelle.

Le principe fondamental de ce test est de supposer que si Y est bien lié linéairement à X, alors la variance intra-individuelle doit être comparable à la variance résiduelle.

Il s'agit d'un test de variances suivant une loi de F-Snedecor:

$$F = \frac{S_Y^2}{S_A^2} = \frac{(n-k)n}{k-2} \frac{\sigma_Y^2 (1 - R_{X\bar{Y}}^2)}{\sum_{i=1}^n n_i \sigma_i^2} \quad (\text{eq 3.33})$$

qui suit une loi de F-Snedecor avec $v_1 = n-2$ et $v_2 = n-k$ degrés de liberté. Voir démonstration annexe A.1.5.

Trois situations se dégagent de test, selon que l'une ou l'autre des variances est soit significativement plus grande, soit plus petite ou encore que les deux variances sont équivalentes par rapport à l'autre.

Les figures 3.50, 3.51 et 3.52 montrent ces trois exemples, à partir de données quelconques.

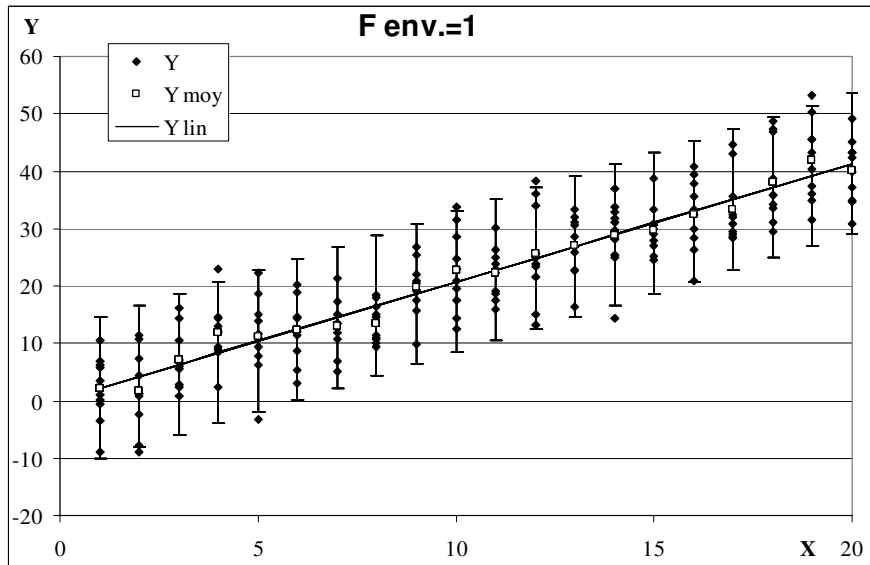


Figure 3.51 Exemple $Y(X)$ ou le test F montre que la loi linéaire est acceptable ($F=0.818$), on voit que les barres d'erreur (variance résiduelle) sont de grandeur comparable à la dispersion des points.

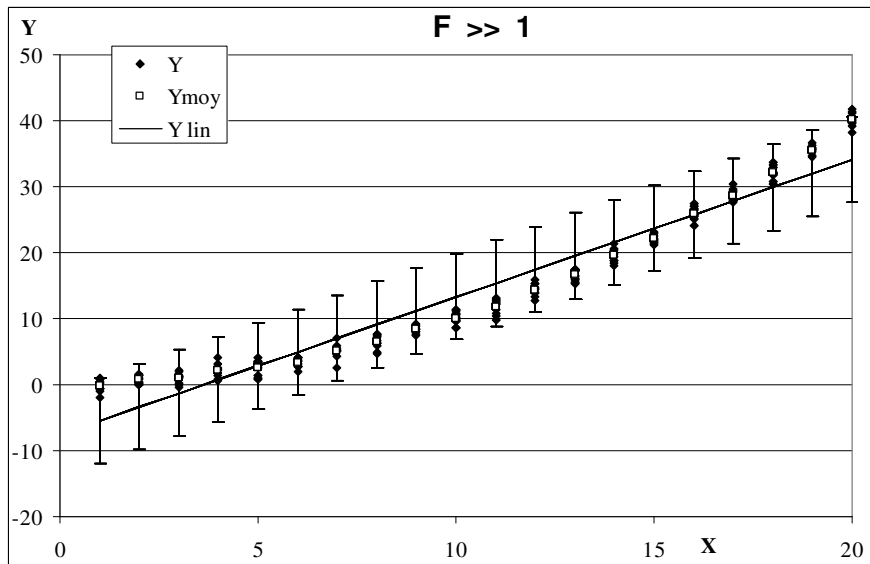


Figure 3.52 Exemple $Y(X)$ ou le test F est significativement supérieur à 1 ($F=112$), on voit que la relation existe mais elle n'est pas linéaire, ce qui fait que les barres d'erreur sont nettement plus grandes que la dispersion des points.

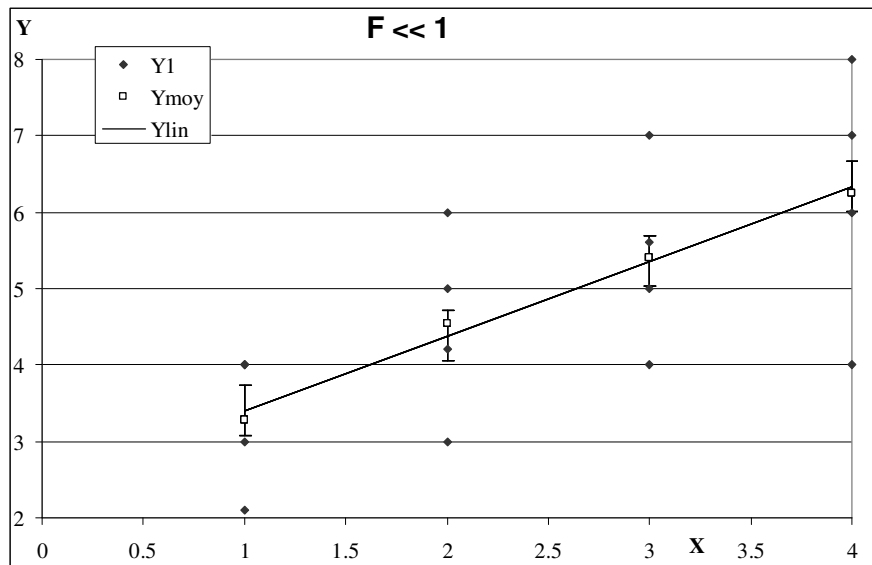


Figure 3.53 Exemple $Y(X)$ où le test F est significativement inférieur à 1 ($F=0.063$), cette fois-ci la dispersion des points est beaucoup plus importante que la variance résiduelle. Cette situation peut se produire quand, par exemple, une autre variable rentre dans l'explication de Y ou, par exemple, quand l'erreur de mesure de Y est très comparable (ou supérieure) à la variation totale de Y .

Comme le montrent ces graphiques, il est important de bien distinguer les trois situations quand on utilise ce test.

Cas général

Dans le cas général, non linéaire et avec nv variables: $Y = F(\vec{X}, \vec{\alpha})$, on peut utiliser le même test mais au lieu de prendre les X_i , on prend directement la prédiction ($Y_i' = F(\vec{X}_i, \vec{\alpha}')$, $\vec{\alpha}'$ est l'estimation des paramètres $\vec{\alpha}'$) par ce modèle des Y . La valeur du F -Snedecor devient alors:

$$F = \frac{(n-k)n}{k-nv-1} \frac{\sigma_{\vec{Y}}^2 (1-R_{\vec{Y}\vec{Y}}^2)}{\sum_{i=1}^n n_i \sigma_i^2} \quad (\text{eq 3.35})$$

3.7.3. Estimations de probabilités (quatrième phase)

L'étude consistait à modéliser des données se trouvant sous deux formes: des acuités et des réponses à des questionnaires correspondant respectivement à une variable continue et une variable discrète. Cependant dans les deux cas, ces variables, relatives à des sujets, étaient soumises à d'importantes variations intra individuelles. On entend par importantes, des variations non négligeables par rapport au domaine de définition de la variable. En effet, en ce qui concerne les questionnaires, les sujets n'avaient qu'un choix limité de réponses (entre 4 et 7 au maximum). Dans ce cas, l'erreur intra-individuelle peut valoir 1 à 2 échelons de réponses, ce qui fait entre 20 et 40% des possibilités de réponses. Ce n'est donc pas du tout négligeable. La principale conséquence de ce phénomène est qu'il limite la valeur de la corrélation que l'on peut attendre entre modèle et données mesurées.

Lorsque l'on met en évidence un modèle susceptible de permettre une prévision, une trop faible corrélation peut produire une erreur importante. C'est pourquoi nous avons estimé à partir de la prévision du modèle des probabilités sur la base de réponses réelles du sujet. Le principe de ce calcul est le suivant:

Soit RR_i la série des réponses réelles (score de la réponse réelle) des sujets et RT_i la série correspondant aux réponses théoriques: prévision de la réponse réelle à partir d'un modèle approprié. Il est à noter que RR_i est une variable discrète, avec k possibilités de réponses (entre 4 et 7 réponses possibles) et que par contre RT_i est une variable continue. Ces opérations sont possibles car les questions étudiées ne sont pas des variables catégorielles mais des variables d'intensité. La probabilité que l'on cherche à déterminer est définie comme la probabilité $P(RT, RR)$ que le sujet réponde avec un score de réponse inférieure ou égale à RR , pour une réponse théorique RT fixée.

Comme RT est une variable continue, il est impossible d'avoir directement des groupes suffisamment importants en effectifs avec une valeur fixe de RT , il faut donc réaliser un regroupement, de la même manière que pour le test de linéarité du paragraphe IV-7.2. On réalise donc k groupes comportant chacun un nombre, non constant, n_i de points. Le regroupement se fait autour des réponses théoriques: le m ^{ième} groupe est défini par la relation $\min(RT) + (m-1) \Delta RT < RT_i \leq \min(RT) + m \Delta RT$, il faut choisir une valeur $\square RT$ de telle manière que, d'une part, on ait suffisamment d'effectifs dans chaque fourchettes et que, d'autre part, RT peut être considéré comme constant à l'intérieur de ces fourchettes. Ce type de regroupement ne donnant pas des groupes aux effectifs homogènes, il fallait parfois éliminer les groupes trop peu représentés ($n_i < 10$). On assimile à chaque groupe une valeur unique (que l'on nomme RT_{0i}) de RT qui est le centre de la fourchette.

$$RT_{0i} = \min(RT) + \left(\frac{2i-1}{2}\right) \Delta RT$$

Le regroupement donne les séries suivantes: RT_{0i} , RT_{ij} et RR_{ij} , i allant de 1 à k et j allant de 1 à n_i .

On estime alors les probabilités en calculant la distribution des réponses réelles des sujets à l'intérieur de chaque groupe $P_i(RR)$ (=fréquence d'une réponse réelle dont le score $\leq RR$ dans le i ^{ième} groupe). On obtient une série de courbes P_i en fonction de RT_{0i} suivant les valeurs de RR . Une nouvelle phase de modélisation s'avère maintenant nécessaire, il s'agit là de déterminer une fonction liant les probabilités P ainsi estimées à RT (représenté par les RT_{0i}).

Les courbes obtenues avaient toujours la même forme (forme de s), et une fonction la représentait assez bien:

Probabilité que la réponse réelle du sujet corresponde à un score inférieur ou égal à RR_0 en fonction de la réponse théorique $RT =$

$$P(RT, RR \leq RR_0) = \frac{(\mu RR_0 + v)^\lambda}{RT^\lambda + (\mu RR_0 + v)^\lambda} \quad (\text{eq 3.36})$$

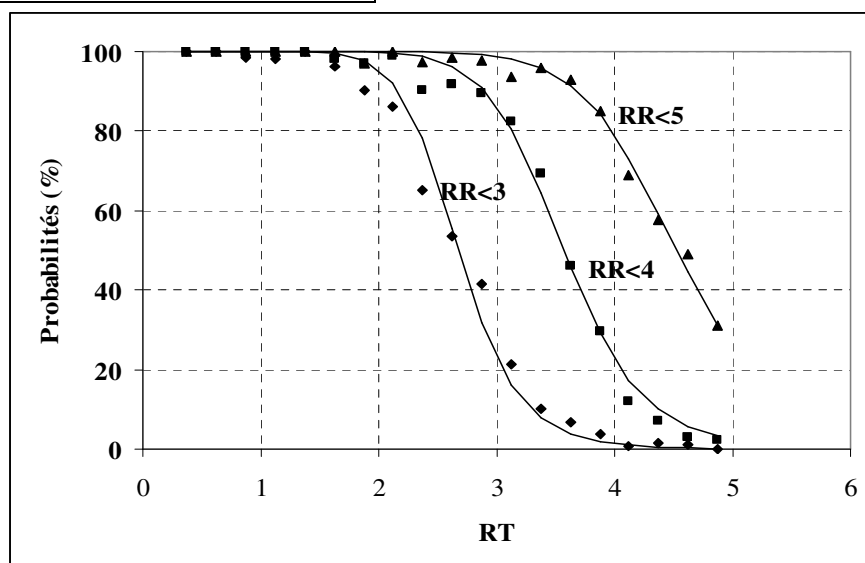


Figure 3.54 Exemple d'une estimation des probabilités (pour trois scores de réponses réelles) au moyen du modèle de l'équation 3.36. On voit bien les courbes en S caractéristiques.

A partir de cette équation, on peut aussi estimer la probabilité que la réponse réelle du sujet soit égale à RR_0 :

$P(RT, RR = RR_0) = P(RT, RR \leq RR_0) - P(RT, RR \leq RR_0 - 1)$, du fait que les réponses réelles sont discrètes.

Ce qui donne finalement:

$$P(RT, RR = RR_0) = \frac{(\mu RR_0 + v)^\lambda}{RT^\lambda + (\mu RR_0 + v)^\lambda} - \frac{(\mu RR_0 + v - \mu)^\lambda}{RT^\lambda + (\mu RR_0 + v - \mu)^\lambda} \quad (\text{eq 3.37})$$

Remarque:

On trouvait des courbes en forme de S essentiellement quand le modèle de prévision des réponses des sujets était correct. On a constaté que si, par exemple, on oubliait une variable dans le modèle, la courbe en S était bien présente mais beaucoup moins net (surtout au niveau de la corrélation entre les probabilités estimées et la fonction 3.36). Ce phénomène permet de se rendre compte de l'influence d'une variable qui n'apparaît pas nettement au niveau des corrélations.

CHAPITRE IV RESULTATS

4.1. Préambule

Comme cela a été explicité dans la méthode au chapitre III, les données mises à profit de cette étude se rapportent essentiellement à deux expériences principales, celle d'un local prototype et celle d'une simulation en laboratoire, ainsi qu'à une expérience accessoire, celle d'un suivi sur le terrain. Les expériences se sont déroulées selon l'ordre chronologique présenté à la figure 4.1.

	2001					2002					2003											
	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
Local prototype	■	■																				
Suivis					■	■	■	■	■													
labo séances 1 à 4						■	■															
labo séances 5 à 8								■	■													
labo séance 9																	■	■				
labo séance 10																					■	■

Figure 4.1. Déroulement chronologique des diverses séances d'expériences

Nous présentons tout d'abord les principaux résultats concernant l'expérience dans le local prototype. En effet, les résultats acquis lors de cette première expérience nous ont amené à améliorer l'expérience de laboratoire et l'expérience de suivi initialement prévues.

Remarque : dans ce chapitre les tableaux croisés sont présentés de la manière suivante: un graphique représentant les pourcentages par colonnes de chaque case du tableau, en dessous duquel figure le tableau des effectifs de ces cases puis le χ^2 et le degré de signification du tableau.

4.2. Expérience dans le local prototype

4.2.1. Caractéristiques physiques de la situation expérimentale

4.2.1.1. Conditions lumineuses

Paramètres photométriques

Les 5 paramètres photométriques présentés sont :

- EH : éclairage horizontal ;
- EY : éclairage vertical mesuré au niveau des yeux ;
- TH : température de couleur mesurée horizontalement ;
- TY : température de couleur mesurée verticalement au niveau des yeux ;
- Lme : luminance maximale dans l'ergorama (en dessous de 45° de l'axe du regard).

Les figures (4.1 à 4.5) illustrent la distribution des principaux paramètres photométriques. Pour chacun de ces paramètres, les 4 valeurs mesurées correspondaient aux 4 modes d'éclairage étudiés, à savoir : 1) avec lumière artificielle pure ; 2) avec lumière naturelle pure ; 3) avec lumière naturelle + lumière artificielle froide; 4) avec lumière naturelle + lumière artificielle chaude.

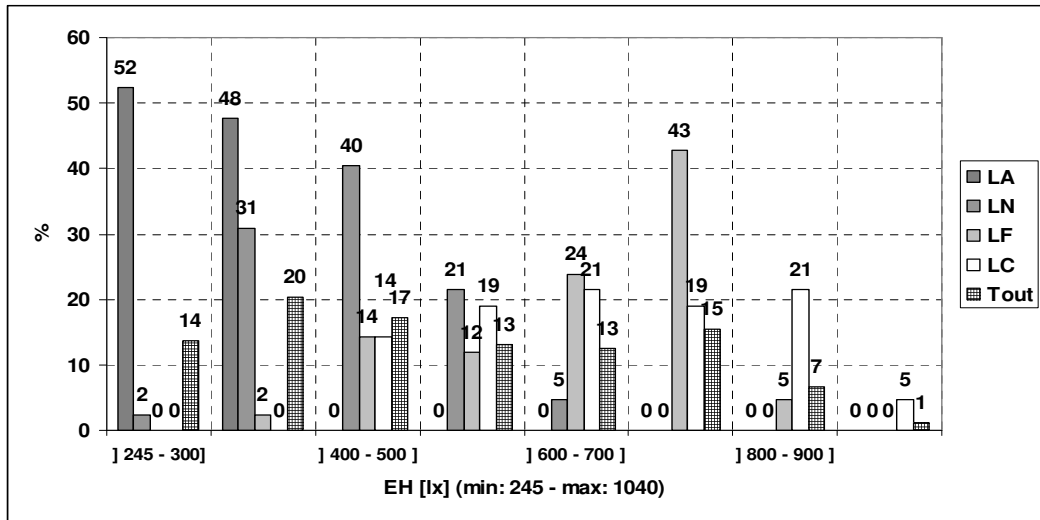


Figure 4.2. Distribution de l'éclairage horizontal pour chaque situation et pour l'ensemble (Tout).

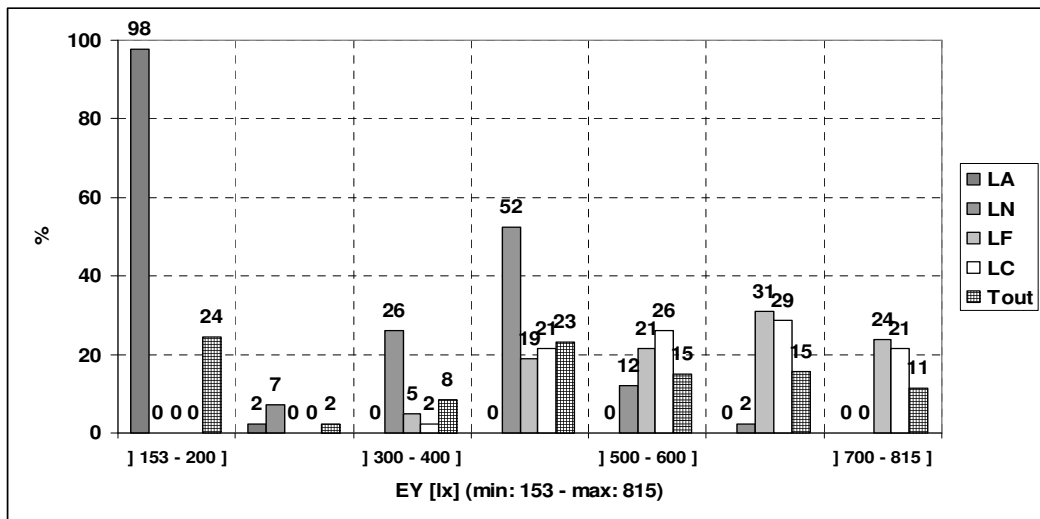


Figure 4.3. Distribution de l'éclairage vertical pour chaque situation et pour l'ensemble (Tout).

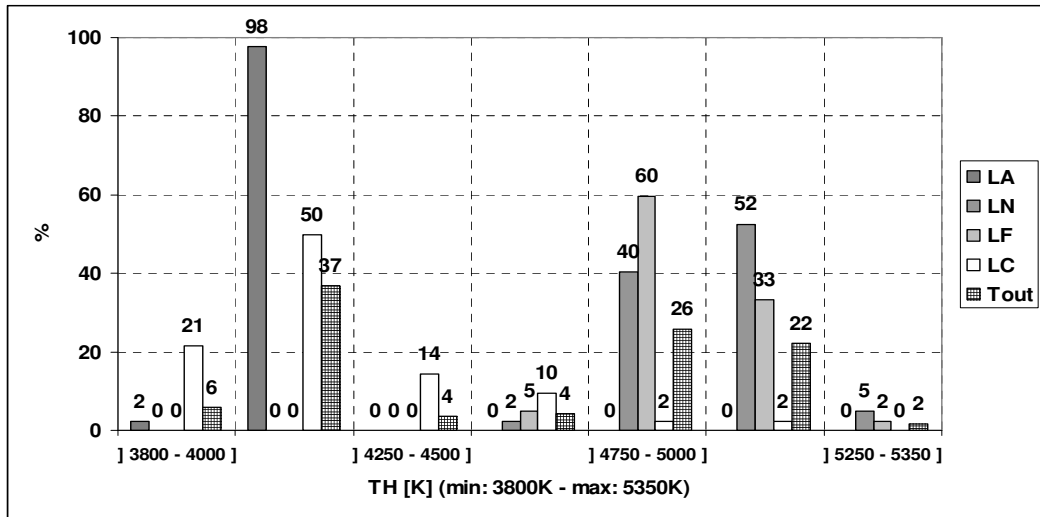


Figure 4.4. Distribution de la température de couleur mesurée horizontalement pour chaque situation et pour l'ensemble (Tout).

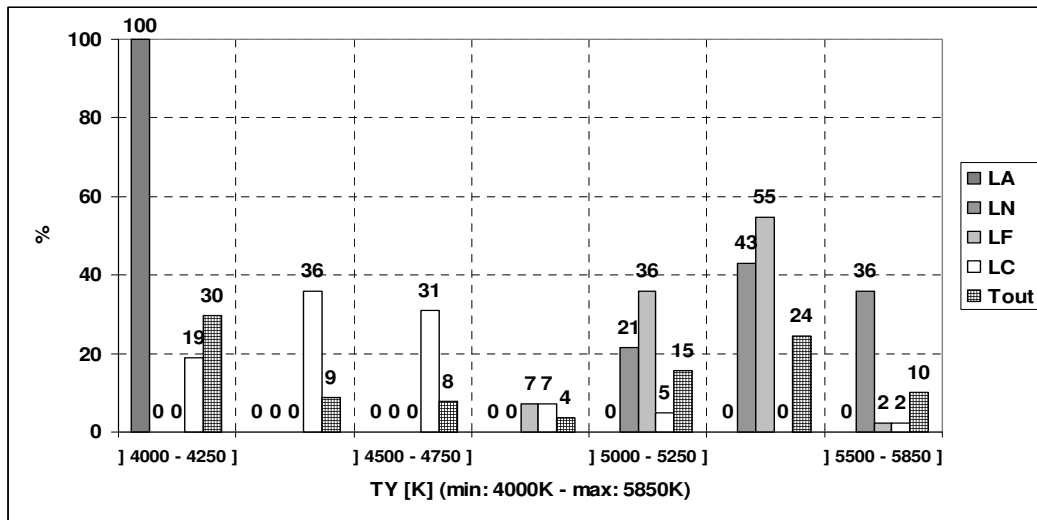


Figure 4.5. Distribution de la température de couleur mesurée verticalement, pour chaque situation et pour l'ensemble (Tout).

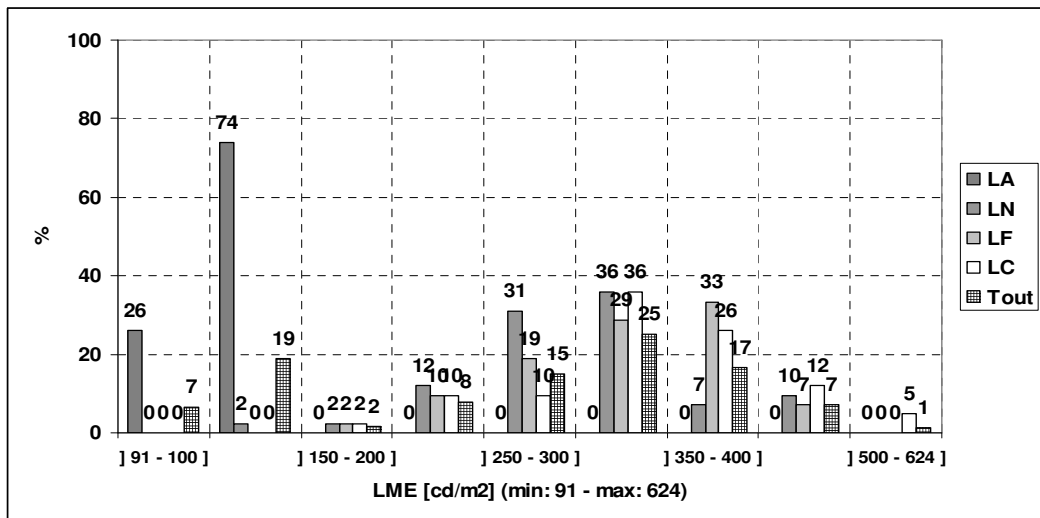


Figure 4.6. Distribution de la luminance maximum dans l'ergorama pour chaque situation et pour l'ensemble (Tout).

	Lme	EY	EH	TY	TH
Lme	1.000	0.887	0.833	0.540	0.424
Ev	0.887	1.000	0.954	0.411	0.276
Eh	0.833	0.954	1.000	0.217	0.108
Tv	0.540	0.411	0.217	1.000	0.832
Th	0.424	0.276	0.108	0.832	1.000

Tableau 4.1. Tableau des corrélations entre les 5 variables photométriques.

Le tableau 4.1 montre des corrélations très nettes entre éclairagements horizontaux, éclairagements verticaux et la luminance maximale dans l'ergorama. On observe également une corrélation importante entre les deux températures de couleurs, horizontale et verticale.

Par comparaison avec les données de terrain (figure 4.7), l'ensemble de ces distributions correspond à une faible dynamique de variation des conditions lumineuses. Les éclairagements et les luminances ont varié dans un rapport d'environ 1 à 5. Quant aux températures de couleur, elles ont varié dans une fourchette de 2000 K, ce qui correspond également à des variations relativement faibles. Le seul point commun aux deux collectifs est la corrélation entre les valeurs d'éclairagement EH et EY.

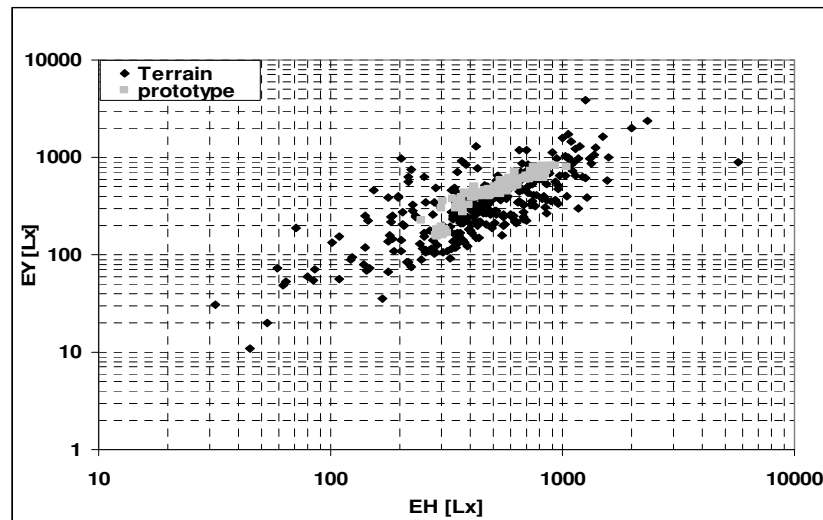


Figure 4.7. Comparaison entre le terrain et le local prototype en terme d'éclairagements horizontaux et verticaux.

Si, par contre, les éclairagements et les températures de couleur ont peu varié, les distributions de lumière étaient cependant très différentes pour chacun des quatre modes d'éclairagement. Cette situation est intéressante pour la validation du modèle de l'indice d'inconfort PIV (cf. §2.2.2) qui implique une contribution majeure des rapports de luminance dans le champ perçu.

En terme d'éclairagements prescrits, les situations étaient en majorité conformes aux recommandations en cours, comme le montre la figure 4.8.

Description en terme des recommandations relatives aux éclairements

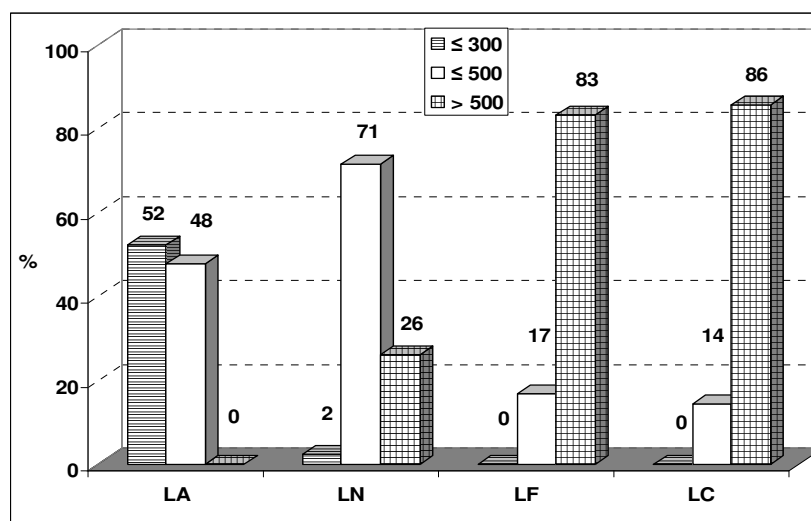


Figure 4.8 Distribution de l'éclairage horizontal pour les quatre situations en terme d'adéquation, d'excès ou de manque selon les recommandations pour le travail sur ordinateur (fourchette 300-500 lx).

La figure 4.8. montre que la situation de lumière naturelle pure (LN) est la meilleure selon les recommandations (71%). La situation de lumière artificielle pure (LA) était un peu sombre (52% pour un éclairage < 300 lx). Les autres situations combinant lumière naturelle et lumière artificielle présentaient un excès de lumière avec des maxima de 900 lx (mais dans ce cas, c'est le sujet qui intervenait).

Description selon l'indice d'inconfort PIV

Rappelons (cf. § 2.2.2.) que ce modèle correspond aux premières tentatives d'élaboration d'un indice d'inconfort faisant intervenir de façon combinée les principaux paramètres photométriques et physiologiques (variabilité inter-individuelle estimée d'après le test de référence C45) déterminant l'acuité.

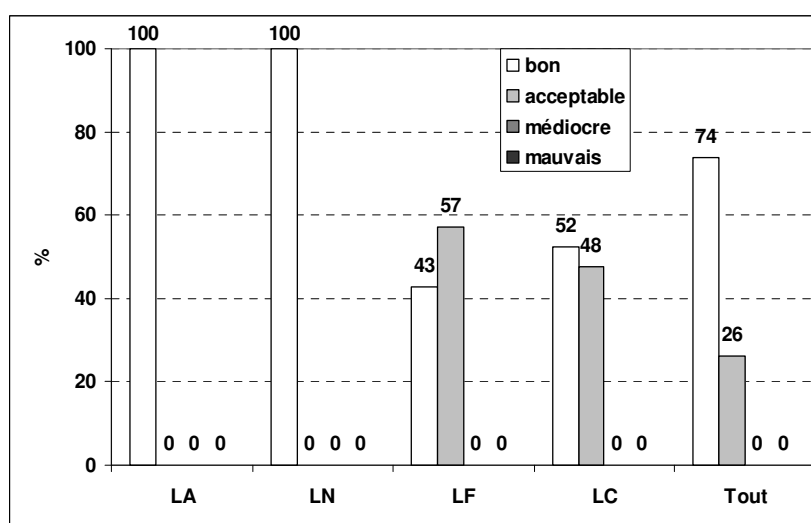


Figure 4.9. Distribution des indices d'inconfort visuel (PIV) pour chacune des quatre situations (LA, LN, LF et LC) ainsi que pour l'ensemble des situations (Tout).

Les critères "bon", "acceptable", "médiocre" et "mauvais" sont fixés pour l'indice PIV en pourcentage d'insatisfaits. Bon : $PIV \leq 25\%$; acceptable : $PIV \leq 50\%$; médiocre $PIV \leq 75\%$; mauvais ; $PIV > 75\%$.

LA = lumière artificielle pure, LN = lumière naturelle pure, LF = utilisation de la lampe de couleur froide et, LC = utilisation de la lampe de couleur chaude.

Le graphique 4.8. montre que, d'après cet indice, les ambiances lumineuses proposées aux sujets ne sont jamais mauvaises ou médiocres, étant même, à près de 75%, qualifiées de bonnes, donc *ni trop sombre, ni éblouissantes*.

Considérant l'ensemble de ces critères photométriques et l'indice de confort PIV, on pouvait admettre que ces conditions étaient favorables pour l'expérience du local prototype. En effet, les sujets étant susceptibles de régler finement des lampes sur pied, il ne fallait pas que les conditions lumineuses soient dès le départ éblouissantes ou trop sombres. Dans ce sens, les protections solaires ont bien joué leur rôle.

4.2.1.1. Variation des conditions thermiques

La figure 4.10. montre que, contrairement aux conditions photométriques, les conditions thermiques ont beaucoup varié (entre 19,5° et 33,6°). En effet, la période de mesure se trouvant au mois de juin, en pleine période caniculaire, les conditions thermiques ont varié énormément en fonction de l'heure de convocation. Si le matin, la température se situait autour des 20-25°, elle pouvait même dépasser, l'après-midi, les 30°. On doit donc prendre en compte le fait que ces variations pouvaient influencer l'évaluation des conditions lumineuses.

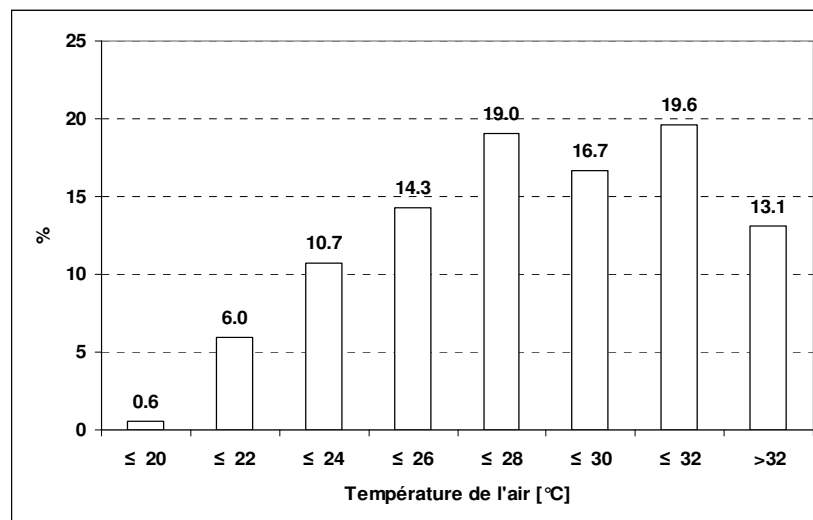


Figure 4.10. Distribution de la température de l'air pour l'ensemble des situations évaluées (minimum= 19.5°, maximum= 33.6°).

Les sujets étaient soumis aux quatre différentes situations pendant une durée d'une heure, délai relativement court pendant lequel la température ne variait pas de façon importante (autour de 1° en moyenne). Cela signifie que la distribution des températures en fonction des situations peut être déduite de la figure 4.10., à savoir que 68.4% des situations étaient caractérisées par une température ambiante supérieure à 28 °C.

4.2.2. Réponses des sujets

4.2.2.1. Impression de confort en terme de "chaud" ou "froid".

Rappelons que la notion de confort visuel ne dépend pas que de l'éblouissement et du besoin en lumière, mais qu'elle est également influencée, par une réaction globale à la couleur dominante des sources de lumière et surfaces blanches réfléchissantes qui apparaissent comme "chaude" ou chaleureuses ou au contraire "froide" ou désagréables. Selon Kruithof, ces associations dépendent néanmoins du niveau d'éclairément.

Pour étudier valider ces relations entre couleur de la lumière et niveau d'éclairément, nous avons posé la question suivante (décrit déjà dans méthode):

*Globalement, l'ambiance lumineuse vous paraît-elle :
très froide(1) – froide(2) – un peu froide(3) – neutre(4) – un peu chaude(5) – chaude(6) –
très chaude(7).*

Chacun des 42 individus ayant répondu à cette question quatre fois (une fois par situation), nous disposons d'un total de 167 réponses (une seule réponse manquante).

Un premier biais, prévisible pour cette validation, est le risque d'obtenir, pour cette question relative à un sentiment généralement inconscient, un grand nombre de réponses " neutre".

Un deuxième problème, qui est apparu au cours de l'expérience, est la difficulté de répondre à cette question quand diverses sources de lumières de température de couleur différentes se trouvaient dans le champ visuel.

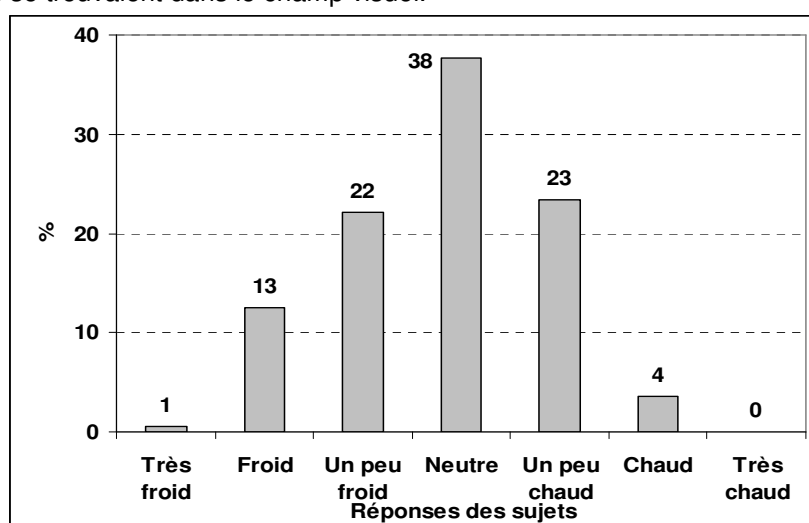


Figure 4.11 Distribution des réponses des sujets à la question concernant l'ambiance lumineuse.

La distribution des réponses (figure 4.11.) montre que, si "neutre" dominait légèrement (38%), les réponses étaient bien nuancées avec également une légère dominance de "froid".

La vérification de l'hypothèse de Kruithoff impliquait de comparer les réponses des sujets avec celles établies selon la méthode d'évaluation de Kruithoff (voir courbes dans paragraphe 2.1.6, figure 2.9).

Ces évaluations ont été réalisées non seulement pour l'éclairément horizontal (comme le faisait Kruithoff à l'époque de son travail), mais également pour l'éclairément vertical au

niveau des yeux, paramètre qui nous a semblé plus appropriée, étant donné sa relation directe avec le champ perçu.

Nous avons effectué l'analyse selon deux regroupements :

Premier regroupement :

Les réponses ont été regroupées en deux catégories :

- neutre
- trop chaud ou trop froid

La relation de Kruithoff a été validée au moyen de tableaux croisés.

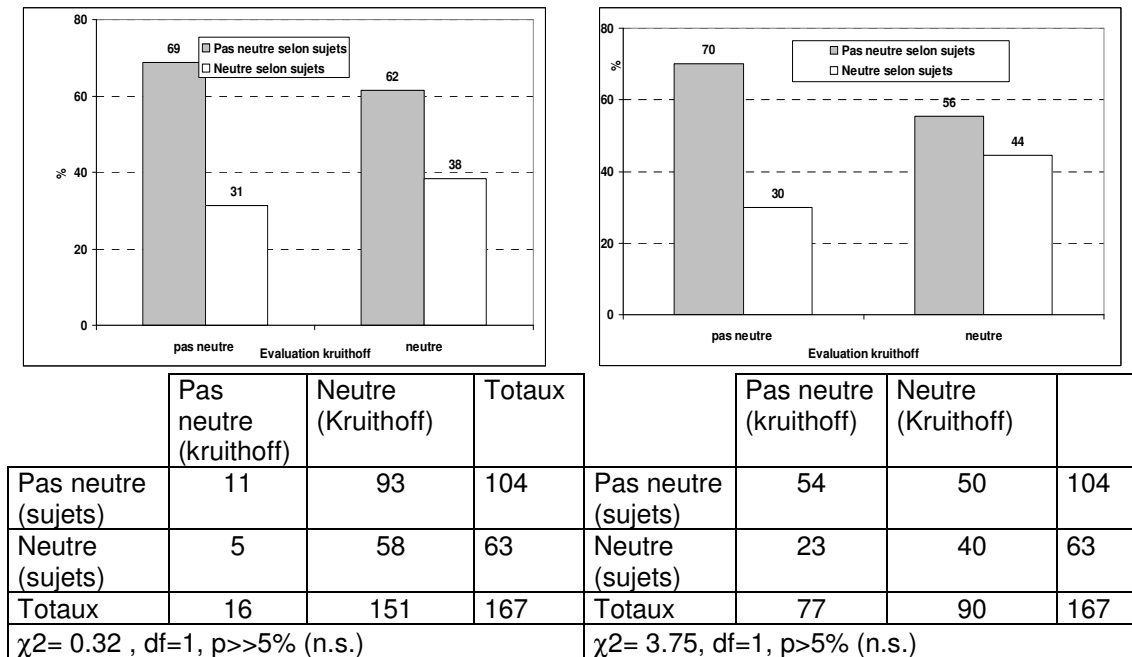


Figure 4.12 Tableaux croisés mettant en relation l'évaluation en terme de sentiment "chaud", "froid" ou "neutre" faite par les sujets et selon la prédiction que donnerait le diagramme de Kruithoff (en abscisse). A gauche : évaluation avec l'éclairage horizontal; à droite, évaluation avec l'éclairage vertical.

Cette analyse met en évidence une non concordance nette entre les deux évaluations subjectives et objectives, que ce soit en utilisant les mesures horizontales ou les mesures verticales. A noter toutefois un χ^2 nettement supérieur avec les mesures verticales (3.75 au lieu de 0.32).

Deuxième regroupement

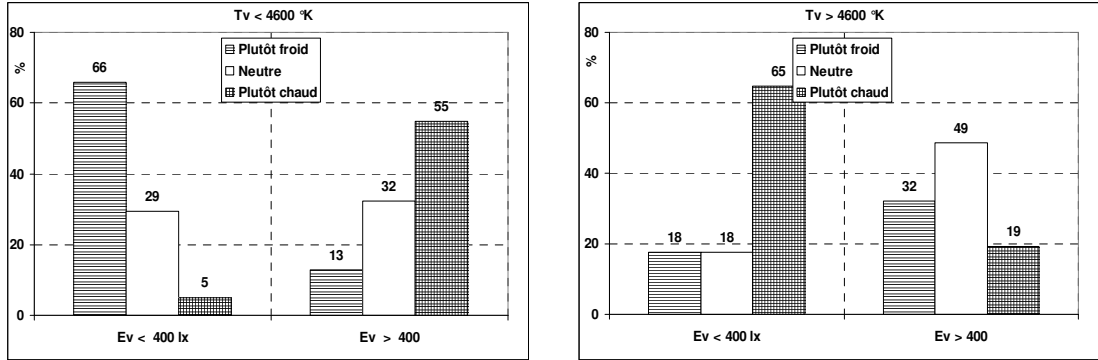
Nous avons validé la relation de Kruithoff pour les éclairagements verticaux et leur température de couleur correspondante en regroupant les réponses des sujets en trois catégories :

- plutôt "froid": réponses 1, 2 et 3 (un peu froid, froid, très froid) ;
- "neutre": réponse 4 ;
- plutôt "chaud": réponses 5, 6 et 7 (un peu chaud, chaud, très chaud).

Les deux graphiques de la figure 4.13 montrent qu'il y a une relation significative entre les réponses des sujets et l'association entre éclairage et température de couleur. Mais par référence à la relation de Kruithoff, les résultats diffèrent sensiblement suivant la température de couleur. En effet, quand la température de couleur s'abaisse en-dessous de 4600 K, et donc que la couleur se réchauffe, le sentiment "chaud"/"froid" semble aller dans le sens de la prédiction de Kruithoff : quand l'éclairage s'abaisse en dessous de 400 lux, la sensation de froideur domine (66%) et au dessus de 400lx la sensation de chaleur domine (55%). Par contre, quand la température de couleur s'élève au-delà de 4600 K et donc que la couleur se refroidit, une inversion se produit et, dans ce cas, la

sensation de chaleur domine à faible éclairciment (alors que selon Kruthoff, la lumière devrait devenir confortable (neutre) à partir de 300 lux).

Ce paradoxe apparent peut être attribué à un phénomène que l'on retrouve très souvent sur le terrain. En effet la lumière artificielle est très souvent perçue comme froide (même s'il s'agit de tubes chauds), alors que la lumière naturelle (surtout par temps ensoleillé) est perçue comme chaude, même si sa température de couleur est relativement plutôt froide. Le graphique suivant (4.13) montre que dans cette expérience, la lumière artificielle dominait bien quand la température de couleur était au dessous de 4600K.



	Tc < 4600 K			Tc > 4600 K		
	Ev ≤ 400	Ev > 400	total	Ev ≤ 400	Ev > 400	total
Plutôt froid	27	4	31	3	25	28
Neutre	12	10	22	3	38	41
Plutôt chaud	2	17	19	11	15	26
Totaux	41	31	72	17	78	95
$\chi^2 = 28.2, df=2, p < < 1\%$			$\chi^2 = 14.7, df=2, p < < 1\%$			

Figure 4.13 Tableaux croisés pour évaluer la liaison entre le sentiment de froideur/chaleur de l'ambiance lumineuse et l'éclairciment vertical/température de couleur verticale. Le tableau de gauche correspond à l'ensemble des cas où la température de couleur verticale était inférieure à 4600 K (72 des 157 cas) ; le tableau de droite correspond aux températures plus "froides".

Les valeurs de 4600 K pour la température de couleur, et de 400 lx pour l'éclairciment ont été déterminées de telle manière que le χ^2 soit maximum.

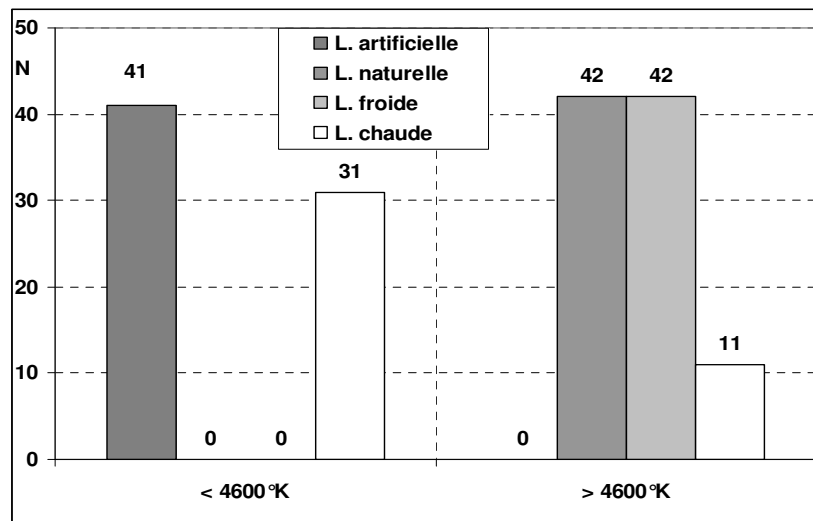


Figure 4.14 Distribution des quatre situations en fonction de la température de couleur.

Pour l'ensemble des 42 sujets, nous disposons de 167 évaluations (4 situations x 42 sujets, moins une donnée manquante pour un sujet en situation de lumière artificielle). Parmi ces 167, la température de couleur était 72 fois inférieure à 4600 K et 95 fois supérieure. Le graphique 4.13 montre que la situation de lumière artificielle représente 41 des 72 cas où la température de couleur est inférieure à 4600 K. Globalement, on peut donc dire que les températures de couleur chaudes correspondent plutôt aux situations avec lumière artificielle et les températures de couleurs froides plutôt aux situations avec lumière naturelle.

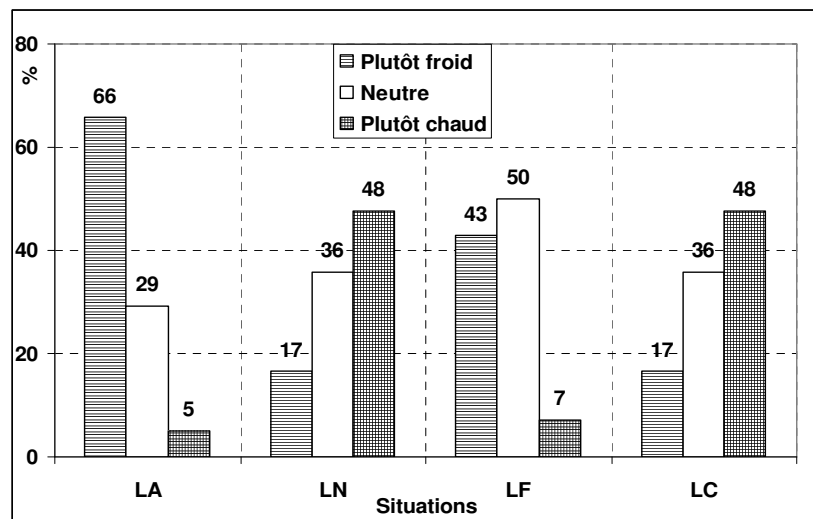


Figure 4.15. Distribution des réponses des sujets en fonction des quatre situations. Les différences entre ces 4 distributions sont significatives.

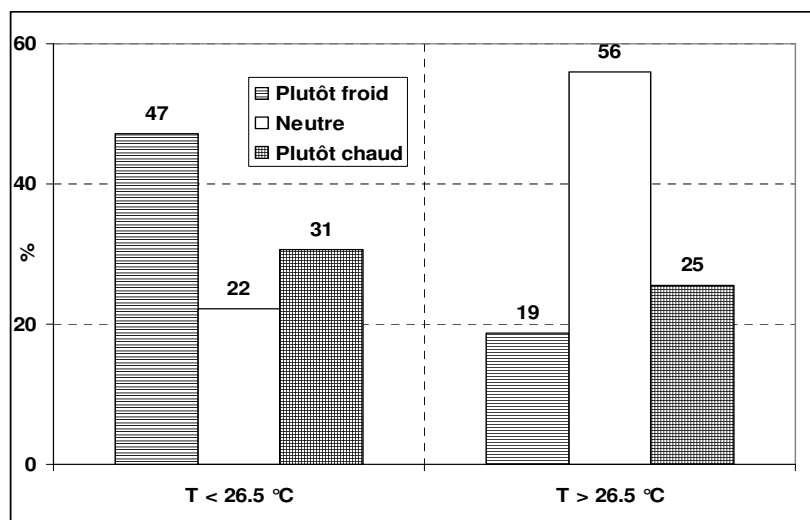
Ce graphique montre que les sujets ont souvent répondu en fonction de la présence de la lumière artificielle qu'ils jugeaient a priori mauvaise, donc froide. Ce genre de réponses correspond assez bien avec les jugements que l'on trouve sur le terrain en général. Par contre, dans les situations où les lumières artificielles et naturelles ont été mélangées (LF et LC sur le graphique), on a retrouvé une bonne correspondance entre sentiments et température de couleur.

Une part de l'explication de l'inversion du phénomène, quand la température de couleur est supérieure à 4600 K, peut être fournie par l'effet de la température de l'air.

4.2.2.2. Influence des conditions climatiques

On voit sur le graphique ci-dessous (figure 4.16) que, lorsque la température de l'air dépassait 26.5°, les sujets répondaient rarement par "froid" mais majoritairement par "neutre" (56%).

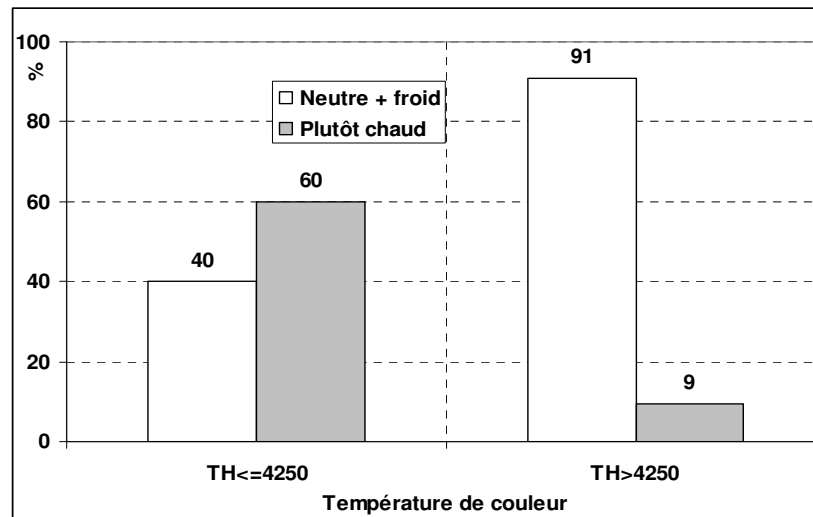
Les graphiques suivants (figures 4.17 et 4.18) montrent que les réponses des sujets étaient influencées, d'une part, par la présence de lumière artificielle et, d'autre part, par les conditions climatiques, ceci notamment pour les deux situations caractérisées l'une par de la lumière artificielle pure et l'autre de la lumière naturelle pure. Les sujets ayant affiché très nettement leur préférence pour la lumière naturelle, on peut se demander si les relations avec les éclairagements et températures de couleur, mises en évidence précédemment (figure 4.13), n'étaient que circonstancielles.



	T ≤ 26.5 °C	T > 26.5 °C	Totaux
Plutôt froid	17	11	28
Neutre	8	33	41
Plutôt chaud	11	15	26
Totaux	36	59	95
$\chi^2 = 12.3, df=2, p < < 1\%$			

Figure 4.16. Tableau croisé mettant en relation la sensation de " chaud / froid " et la température de l'air dans les cas où la température de couleur verticale était supérieure à 4600 K.

Lorsque les sujets étaient soumis aux conditions lumineuses combinant lumière artificielle et lumière naturelle, ils pouvaient ajuster eux-mêmes le niveau de lumière souhaité. Les relations avec les éclairagements et la température ont donc été étudiées une nouvelle fois dans le cadre de ces deux situations, ceci notamment en considérant l'éclairage horizontal, lequel était essentiellement modifié par le réglage des lampes d'appoint.

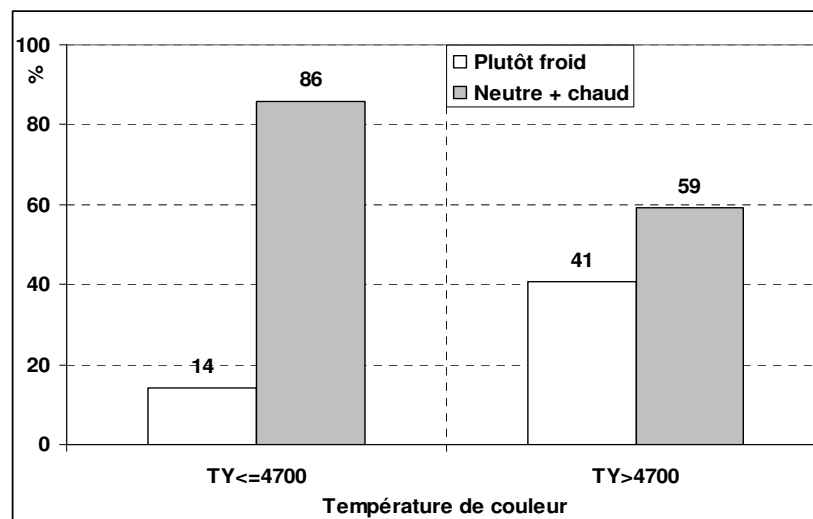


	TH ≤ 4250 °K	TH > 4250 °K	Totaux
Neutre + froid	12	49	61
Plutôt chaud	18	5	23
Totaux	30	54	84

$\chi^2 = 25, df=1, p << 1\%$

Figure 4.17. Relations entre la sensation de chaleur / froideur et la température de couleur mesurée horizontalement.

Ce graphique montre que la température de couleur mesurée horizontalement a effectivement joué un rôle dans l'appréciation des sujets. Quand cette température dépasse 4250 K, on peut prédire, d'après ces résultats, que la majorité des sujets ne trouvent pas l'ambiance lumineuse chaude.



	TY ≤ 4700	TY > 4700	Totaux
Plutôt froid	5	20	25
Neutre + chaud	30	29	59
Totaux	35	49	84

$\chi^2 = 6.9, df=1, p << 1\%$

Figure 4.18. Tableau croisé mettant en relation la sensation de "chaud/froid" et la température de couleur mesurée verticalement.

La température de couleur mesurée verticalement a, elle aussi, eu une influence sur l'appréciation des sujets. Par contre, dans ce cas, on a sélectionné beaucoup mieux les situations d'ambiances pas froides. En effet, d'après ces résultats, si $TY \leq 4700$ K, on peut prédire que l'ambiance ne paraîtra pas froide.

En résumé, ces résultats montrent l'interférence sur le sentiment de confort de l'éclairage et de la couleur de la lumière. Cette relation était néanmoins fortement influencée par plusieurs facteurs liés, d'une part, aux conditions ambiantes et, d'autre part, au protocole de la situation expérimentale.

La question de base se pose de savoir si le besoin en lumière ou la gêne à l'éblouissement est susceptible d'être influencé par la température de couleur ou l'inverse. Cette problématique sera reprise plus loin au paragraphe 4.4.2.4.

4.2.2.3. Réponses exprimant la sensation de luminosité

Il est connu que la loi de perception du niveau de l'intensité lumineuse (loi de Weber-Fechner) est logarithmique. Toutefois, la perception de la luminosité est soumise à d'autres facteurs que la luminance physique de la tâche tels que:

- le contraste entre l'environnement et la cible (par exemple, effet du contre-jour) ;
- la température de couleur de la cible ;
- la sensibilité à la lumière du sujet ;
- la nature de la source perçue (par exemple document éclairé indirectement ou affichage électronique).

Evaluation des réactions à la lumière par l'ajustement du niveau d'éclairage des luminaires d'appoint

Les sujets devaient ajuster eux-mêmes la lampe sur pied à leur disposition, à un niveau correspondant à une situation qui leur paraissait aussi agréable que possible pour un travail sur écran. L'enregistrement des variations de luminosité devait alors nous permettre de savoir si celles-ci étaient reliées au profil du sujet via la luminance physiologique L_m , tirée du test C45, paramètre représentant une mesure du besoin en lumière du sujet.

Cette liaison a pu être vérifiée par un modèle (eq 4.1) exprimant la relation entre l'éclairage horizontal après réglage (noté EHf, éclairage final), d'une part, l'éclairage horizontal avant réglage (noté EHi, éclairage horizontal initial) et d'autre part, la luminance physiologique des sujets (L_m).

Ce modèle présenté ci-dessous, montre clairement que les deux variables EHi et L_m contribuent bien à estimer EHf:

$$EHf = \varepsilon_1 L_m + \varepsilon_2 EHi + \varepsilon_3 \quad (\text{eq 4.1})$$

Les coefficients ont été estimés à l'aide d'un ajustement linéaire:

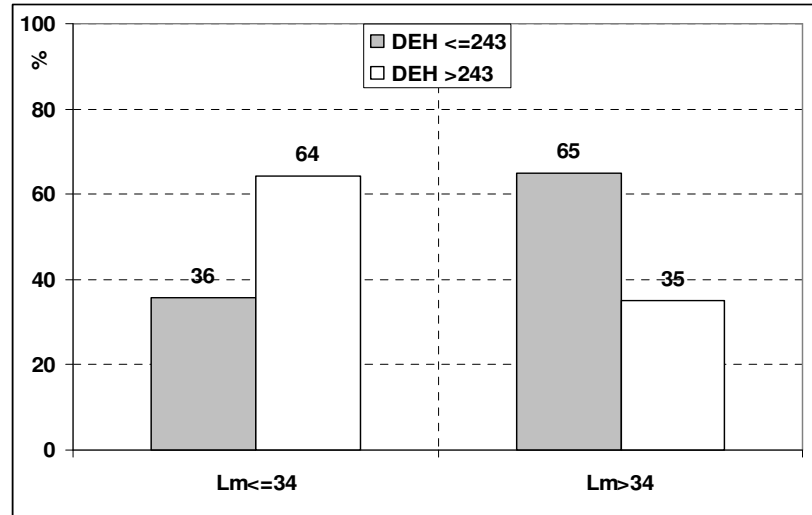
$$\begin{cases} \varepsilon_1 = -1.52 & \Delta\varepsilon_1 = 0.50 \\ \varepsilon_2 = 0.62 & \Delta\varepsilon_2 = 0.17 \\ \varepsilon_3 = 452 & \Delta\varepsilon_3 = 72 \end{cases}$$

La corrélation entre ce modèle et les valeurs mesurées de EHf est de 0.432 soit une valeur faible mais toutefois significative. Ceci s'explique par la faible dynamique de variation des conditions photométriques décrite au paragraphe 4.2.1.1.

Ayant calculé les écarts-type de ces trois coefficients, il était alors permis de tester statistiquement l'hypothèse selon laquelle ces 3 coefficients sont non nuls, ce qui signifie que les variables correspondant aux coefficients participent bien à l'explication de EHf. (pour le principe du test, voir le paragraphe A-1.1 de l'annexe concernant les ajustements linéaires).

La valeur $t_i = \frac{\varepsilon_i}{\Delta\varepsilon_i}$ suivant une loi normale, on peut admettre que les trois coefficients sont

bien significativement différents de zéro. et donc que la luminance physiologique L_m représentant le profil visuel, apparaît donc bien comme une variable qui entre en ligne de compte dans le réglage effectué par les sujets. Le tableau croisé suivant montre la relation entre la variation d'éclairement ($DEH=EH_f-EH_i$) et L_m .

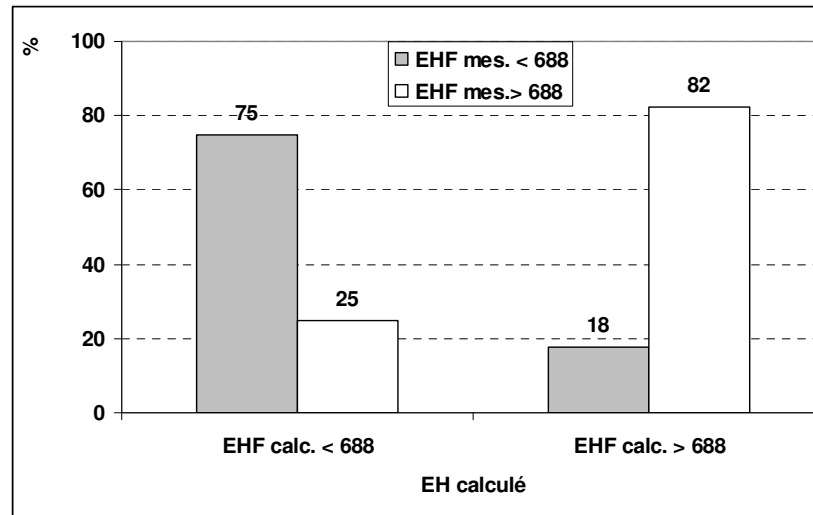


	$L_m \leq 34$	$L_m > 34$	Totaux
DEH ≤ 243	15	26	41
DEH > 243	27	14	41
Totaux	42	40	82

$\chi^2 = 7.0, df=2, p << 1\%$

Figure 4.19. Tableau croisé mettant en relation la variable exprimant la sensibilité des sujets à la lumière L_m et la variation d'éclairement horizontal.

Cette relation avec L_m met en évidence un fait intéressant : le coefficient estimé correspondant à l'influence de L_m , ayant un signe négatif, cela signifie que plus la valeur L_m d'un sujet donné était élevée, moins celui-ci éprouvait le besoin d'ajouter de la lumière. Ce comportement n'est paradoxal qu'en apparence. En effet, les sujets devaient régler la lumière des lampes sur pied en fonction de leur tâche sur l'écran dont la luminance ne variait que très faiblement. Si donc le sujet augmentait la lumière de l'environnement, l'écran risquait à un moment donné de lui paraître trop sombre par effet de contraste. Ainsi, plus élevée était sa valeur L_m plus sombre devait lui paraître l'écran et par conséquent, moins il rajoutait de lumière dans l'environnement.



	EHF (calc.) ≤ 688	EHF (calc.) > 688	Totaux
EHF (mes.) ≤ 688	36	6	42
EHF (mes.) > 688	12	28	40
Totaux	48	34	82

$\chi^2 = 26.2, df=2, p < < 1\%$

Figure 4.20 Tableau croisé montrant la relation entre l'éclairement horizontal après le réglage des sujets, calculé (EHF calc.) par le modèle proposé et celui réellement mesuré (EHF mes.).

Ce graphique montre que le modèle proposé (eq 4.1) donne un tableau croisé encore plus significatif que celui de ΔEH en fonction de L_m seul (le χ^2 passe de 7 à 26.2). Cela met en évidence que la variation d'éclairement ΔEH ne varie pas seulement en fonction de L_m mais aussi en fonction de l'éclairement initial (EHi). Ceci est logique, car il est évident que si l'éclairement initial est trop important, le sujet ne voudra plus augmenter la lumière, et il aura plutôt tendance à diminuer la lumière. Inversement, plus l'éclairement initial est faible, plus le sujet va augmenter la lumière pour compenser un manque.

Perception de la luminosité de la tâche

Rappelons que les deux questions posées étaient les suivantes:

*Trouvez-vous (ou ressentez-vous) la luminosité de l'écran comme étant :
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) –
très élevée(7)*

*Trouvez-vous la luminosité du document imprimé comme étant :
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) –
très élevée(7)*

Rappel des hypothèses: le sentiment de luminosité dépend à la fois de la luminance de la tâche, du contraste entourage-tâche et de la sensibilité du sujet.

Par la suite nous considérons que les sujets :

- ressentent un manque de lumière quand ils répondent *très faible, faible et un peu faible*
- ressentent un excès de lumière quand ils répondent *très élevée, élevée et un peu élevée*

Nous avons évalué le contraste (C_{ec}) "environnement – tâche" par le rapport entre la luminance moyenne du champ visuel et la luminance de la tâche, ce qui donne pour les deux types de cibles les équations suivantes :

$$\text{Pour l'écran: } C_{ec} = \frac{L_{moy}}{L_E} = \frac{EY}{\pi L_E} \quad (\text{eq 4.2})$$

$$\text{Pour le document: } C_{ec} = \frac{EY}{\pi L_d} = \frac{EY}{\rho_d EH} \quad (\text{eq 4.3})$$

avec $L_{moy} = \frac{EY}{\pi}$, $L_d = \rho_d \frac{EH}{\pi}$, ρ_d = facteur de réflexion du document,

L_{moy} = luminance moyenne du champ visuel (autour de l'écran), L_d = luminance du document imprimé, L_E = luminance de l'écran.

A noter que EY , l'éclairement vertical sur les yeux, a été mesuré avec l'écran éteint ce qui permet de l'assimiler à l'éclairement provenant de l'entourage de l'écran.

A) Cas de l'écran seul

Dans le cadre de cette expérience, la luminance de l'écran était fixée à 100 cd/m^2 sans tenir compte toutefois d'une légère variation, insignifiante, en relation avec la quantité de lumière qu'il recevait, ce qui signifie que le contraste entre l'écran et son entourage variait beaucoup plus nettement que la luminosité de l'écran.

Etude de l'effet du contraste "entourage-écran" (fig.4.21 et 4.22)

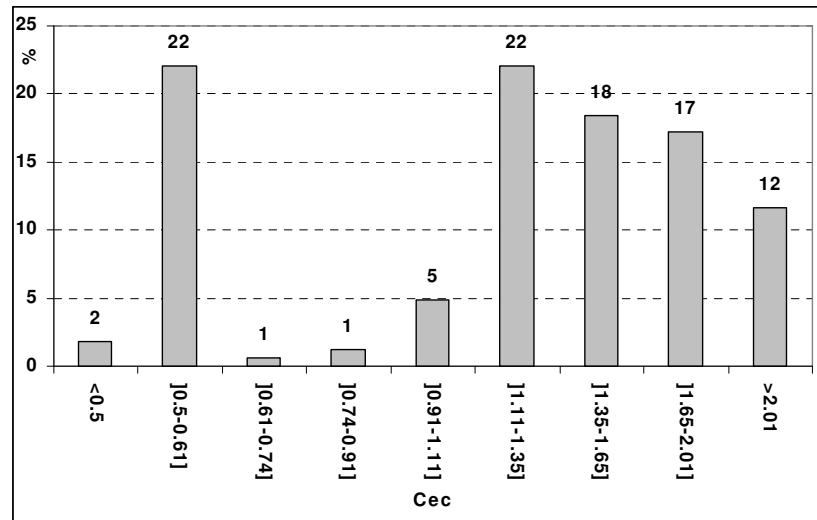
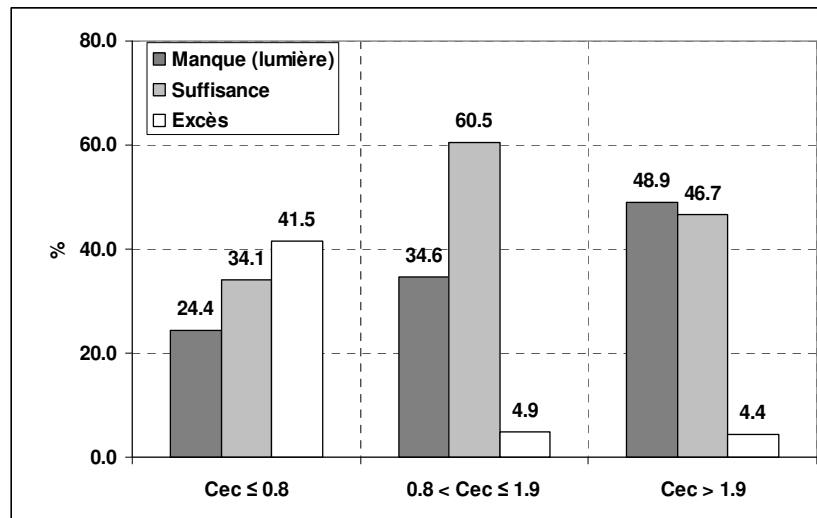


Figure 4.21. Distribution, en échelle log., du contraste "entourage-écran" (Cec).

Le contraste C_{ec} a varié de 0.48 à 2.34, mais de façon irrégulière pour les valeurs situées en-dessous de 1.1. Les 22% des valeurs situées entre 0.5 et 0.6 correspondent à la situation de lumière artificielle pure.



	Cec ≤ 0.8	0.8 < Cec ≤ 1.9	Cec > 1.9	Totaux
Manque (lumière)	10	28	22	60
Suffisance	14	49	21	84
Excès	17	4	2	23
Totaux	41	81	45	167

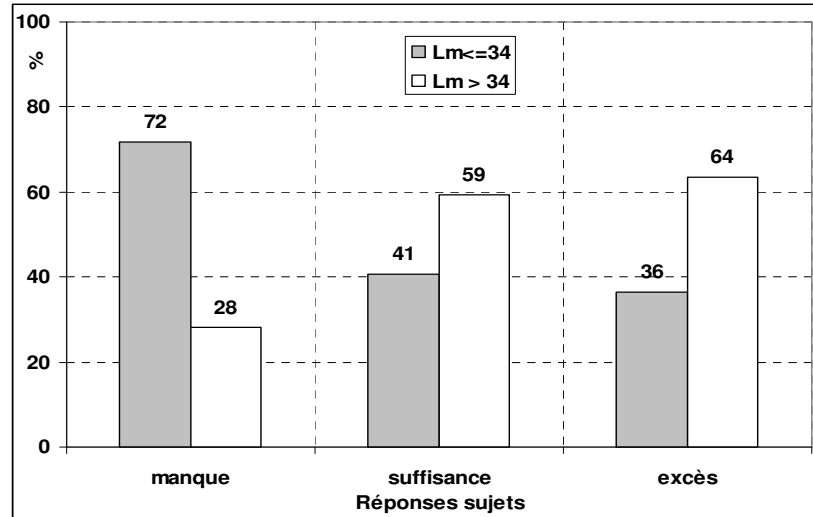
$\chi^2 = 37.8, df=4, p << 1\%$

Figure 4.22. Tableau croisé mettant en relation la perception de luminosité de l'écran et le rapport luminance moyenne de l'entourage sur la luminance de l'écran (contraste entourage - écran). Les fourchettes pour le contraste C_{ec} données ici correspondent à celles permettant d'avoir un χ^2 maximum.

Ce tableau croisé indique que la fourchette $0.8 < C_{ec} \leq 1.9$, pour le contraste "entourage-écran", sélectionne bien les bons cas (60%). Par contre, la sélection est moins bonne en dehors de cette fourchette (41% de sentiment d'excès de lumière pour $C_{ec} \leq 0.8$, et 49%

de sentiment de manque de lumière pour $Cec > 1.9$). L'hypothèse de la liaison entre la perception de luminosité de l'écran et le contraste de ce dernier par rapport à l'entourage est donc confirmée : plus le contraste est élevé, ce qui correspond à un environnement plus lumineux que l'écran, plus ce dernier paraît sombre et vice-versa.

Etude de l'effet de la luminance L_m (Fig. 4.23.)



	manque	adéquation	excès	Totaux
$L_m \leq 34$	43	33	8	84
$L_m > 34$	17	48	14	79
Totaux	60	81	22	163
$\chi^2 = 15.5, df=2, p << 1\%$				

Figure 4.23. Tableau croisé représentant la relation entre la perception de luminosité de l'écran et le profil du sujet exprimé par la luminance physiologique L_m .

On voit sur ce tableau que les sujets ayant répondu que l'écran leur apparaissait plutôt sombre, étaient majoritairement (72%) ceux pour qui L_m était faible ($< 34 \text{ cd/m}^2$) et que ceux qui ont répondu que l'écran était plutôt claire, étaient majoritairement (64%) ceux pour qui L_m était élevé ($> 34 \text{ cd/m}^2$). L'influence de la perception de luminosité par le profil du sujet est donc validée pour le cas de l'écran.

En résumé: Cette situation a montré que la perception de la luminosité dépendait, d'une part, de l'effet du contraste "entourage – écran" et, d'autre part, de la valeur L_m supposée rendre compte de la sensibilité à la lumière des sujets.

B) Cas du document imprimé

Contrairement au cas de l'écran, la luminance du document imprimé, entièrement déterminée par l'éclairage horizontal, variait nettement. Cela permettait donc de tester la relation entre perception de luminosité et la luminance physique de la tâche. Dans ce cas, contrairement à ce qui se passait pour l'écran, le contraste document – entourage, ne variait que faiblement.

Etudes de l'effet de la luminance (Fig.4.24., 4.25.)

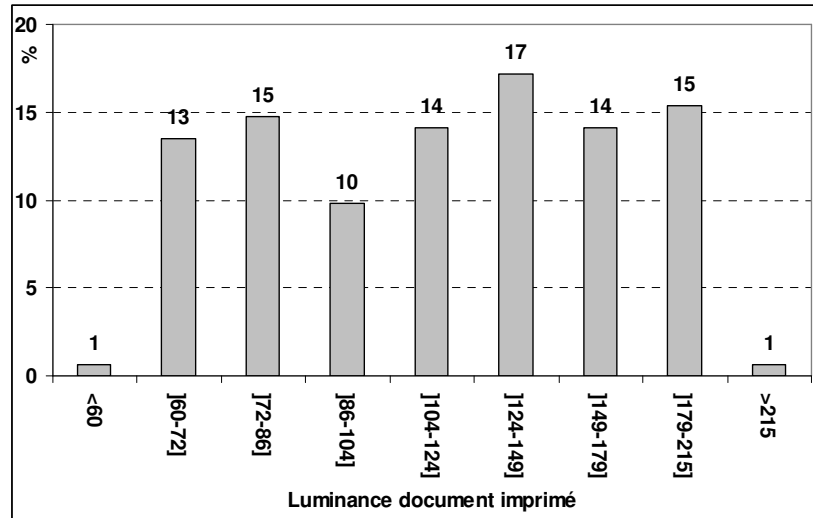
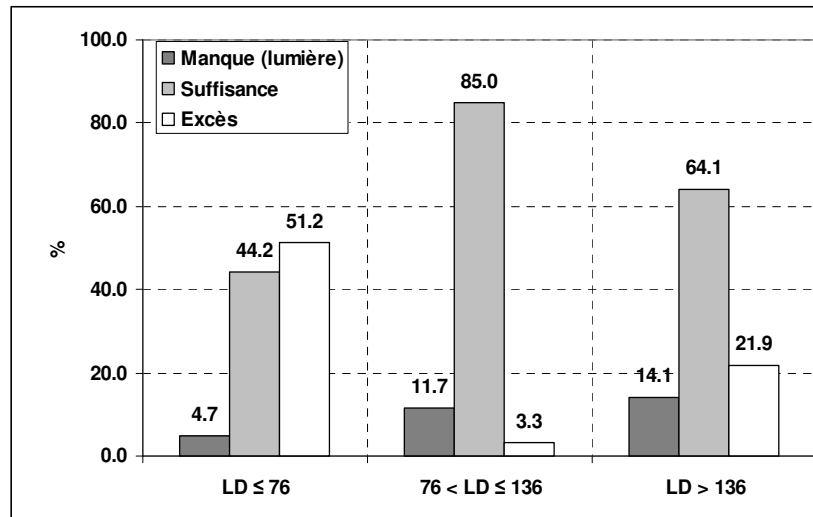


Figure 4.24. Distribution (en échelle log) de la luminance du document imprimé. L'effectif total était de 163 (une seule réponse manquante).

La luminance du document a varié entre 58 et 248 cd/m^2 ce qui représente entre ces deux valeurs un facteur d'environ 4. Considérant la loi de Weber-Fechner, cet intervalle ne correspond pas a priori une variation importante.



	LD ≤ 76	76 < LD ≤ 136	LD > 136 cd/m^2	Totaux
Manque (lumière)	2	7	9	18
Suffisance	19	51	41	111
Excès	22	2	14	38
Totaux	43	60	64	167

$\chi^2 = 33.8, df=4, p < < 1\%$

Figure 4.25. Tableau croisé mettant en relation la luminance du document imprimé (LD) et la perception de sa luminosité

Bien que significative cette relation entre luminance et sentiment de luminosité est paradoxale. En effet, la relation va dans le sens inverse de celle qui était attendu, une

luminance faible étant associée à un sentiment d'excès de lumière, comme le montre la figure 4.26. Cela peut s'expliquer par le fait que la luminance du document ne présentait probablement pas une variation suffisante relativement aux autres influences comme, par exemple, celle du contraste.

Etude du contraste entourage-document (Fig 4.26, 4.27)

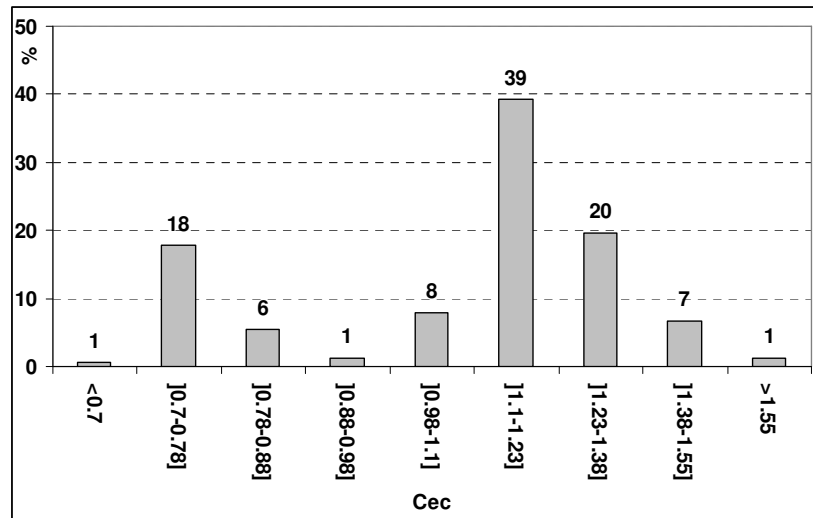
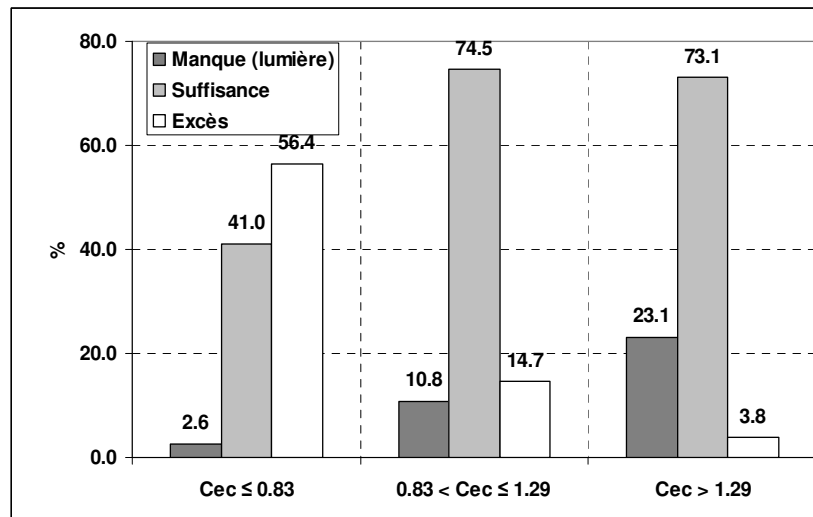


Figure 4.26. Distribution (en échelle log) du contraste "entourage – document".

Ce rapport a varié de 0.68 à 1.60, avec une prédominance de 24% des situations entre 0.7 et 0.9 (lumière artificielle pure) et 59% des situations entre 1.1 et 1.4 (lumière naturelle + lampe sur pied).

Le facteur de variation du contraste était environ 2 fois plus faible que dans le cas de l'écran.



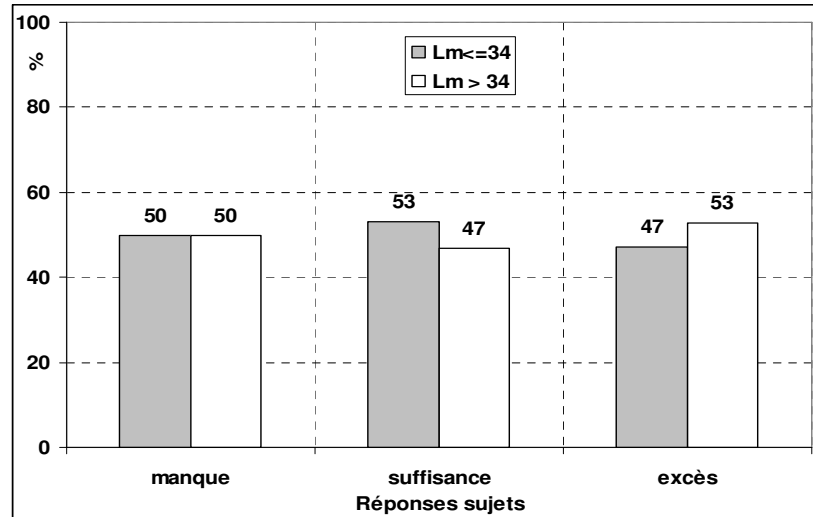
	Cec ≤ 0.83	0.83 < Cec ≤ 1.29	Cec > 1.29	Totaux
Manque (lumière)	1	11	6	18
Suffisance	16	76	19	111
Excès	22	15	1	38
Totaux	39	102	26	167

$\chi^2 = 37.4, df=4, p < < 1\%$

Figure 4.27. Tableau croisé mettant en relation la perception de la luminosité du document imprimé et le contraste entre le document imprimé et l'entourage.

On retrouve ici l'influence très nette du contraste sur la perception de luminosité. Ce tableau permet aussi d'établir une fourchette de contraste ([0.83 – 1.2]), dans laquelle la luminosité du document est considérée comme suffisante (à 75%). Cette fourchette est comparable à celle trouvée dans le cas de l'écran ([0.80 – 1.90]), à la seule différence, toutefois, qu'avec un contraste supérieur à 1.29, on a encore 73% de satisfaits. Cela est probablement dû au manque de variation de ce contraste.

Etude de l'effet de la luminance physiologique Lm (cas du document imprimé)



	manque	adéquation	excès	Totaux
Lm ≤ 34	9	58	17	84
Lm > 34	9	51	19	79
Totaux	18	109	36	163
$\chi^2 = 0.4, df=2, p=81\%, n.s.$				

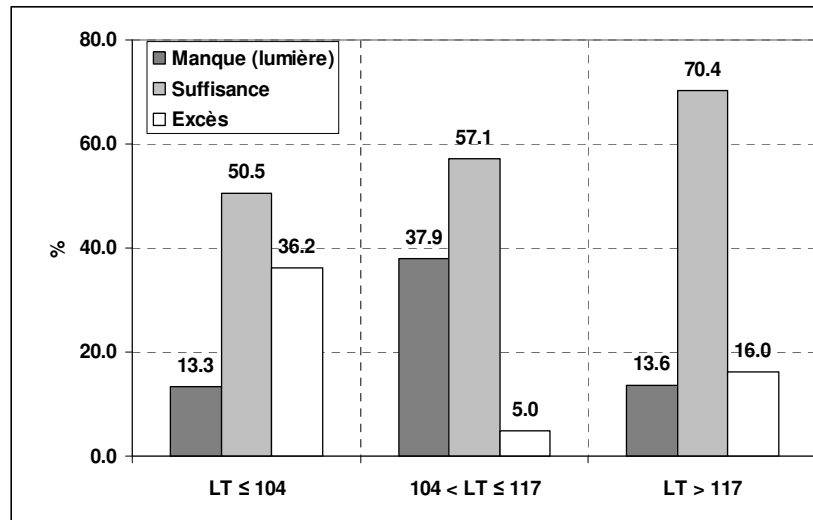
Figure 4.28. Etude de la relation entre la perception de luminosité du document imprimé et le profil du sujet exprimé par la luminance physiologique Lm.

Ces résultats non significatifs montrent que dans le cas du document imprimé, seul le contraste a eu une influence sur la perception de luminosité. Les autres paramètres, luminance du document et luminance physiologique, n'ont pas eu d'influence.

C) Perception de la luminosité pour l'ensemble écran + document imprimé

Dans cette situation expérimentale, on considèrerait la tâche (l'activité du sujet), comme comportant la lecture en alternance de l'écran et de celle du document imprimé, ce qui revient donc à rassembler les réponses concernant l'écran avec celles concernant le document imprimé.

Etude de l'effet de la luminosité de la tâche comportant l'écran + le document

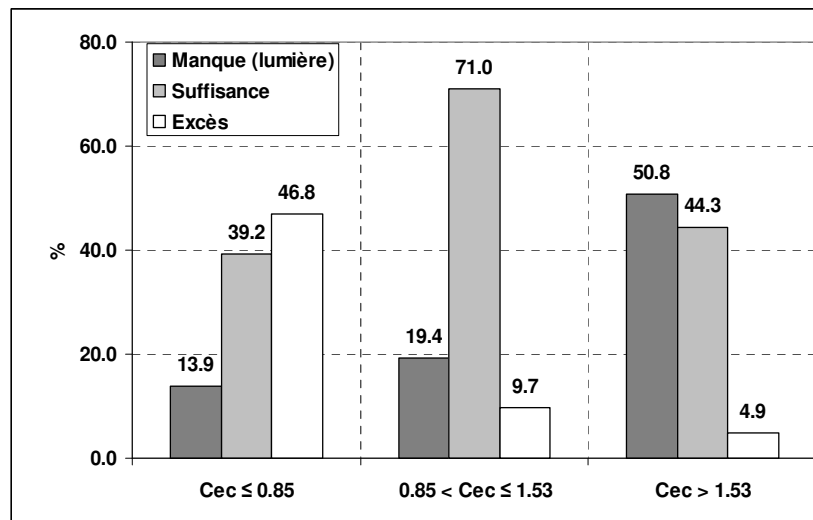


	LT ≤ 104	104 < LT ≤ 117	LT > 117 cd/m ²	Totaux
Manque	14	53	11	78
Suffisance	53	80	57	190
Excès	38	7	13	58
Totaux	105	140	81	326

$\chi^2 = 56.1, df=4, p < < 1\%$.

Figure 4.29. Tableau croisé mettant en relation la perception de la luminosité et la luminance de la tâche (document + écran).

Etude de l'effet du contraste "entourage-tâche" (avec l'écran + le document)

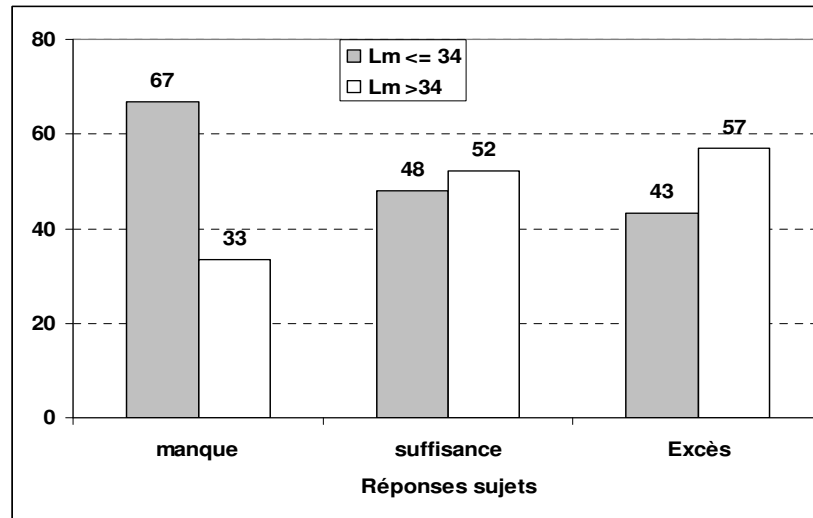


	Cec ≤ 0.85	0.85 < Cec ≤ 1.53	Cec > 1.53	Totaux
Manque (lumière)	11	36	31	78
Adéquation	31	132	27	190
Excès	37	18	3	58
Totaux	79	186	61	326

$\chi^2 = 85.5, df=4, p < < 1\%$

Figure 4.30. Tableau croisé mettant en relation la perception de la luminosité de la tâche et le contraste "entourage - tâche", la tâche correspondant à l'ensemble l'écran + document.

Etude de l'effet la luminance physiologique L_m (avec l'écran + le document)



	manque	adéquation	excès	Totaux
L _m ≤ 34	52	91	25	168
L _m > 34	26	99	33	158
Totaux	78	190	58	326

$\chi^2 = 9.8, df=2, p < < 1\%$.

Figure 4.31. Tableau croisé mettant en relation la perception de la luminosité de la tâche (écran + document) et le profil du sujet (luminance physiologique L_m).

On retrouve ici le même phénomène observé pour le document imprimé pris isolément (figure 4.26.), ce qui est normal puisqu'il n'y avait que la luminance du document qui variait. La relation trouvée ne correspond donc ici non plus à ce qui était attendu.

Ainsi, quand on prend le cas de la lecture combinée d'un document imprimé ou d'un écran, la perception de luminosité dépend bien à la fois du profil du sujet et du contraste avec l'entourage. Par contre, dans le cadre de cette expérience et des conditions lumineuses caractérisant le local prototype, la luminance de la cible en elle-même n'a rien apporté, car elle n'a pas varié insuffisamment.

On peut observer l'effet du contraste dans les distributions des réponses des sujets pour chacune des quatre situations validées pour le document imprimé (figure 4.32) et l'écran (figure 4.33).

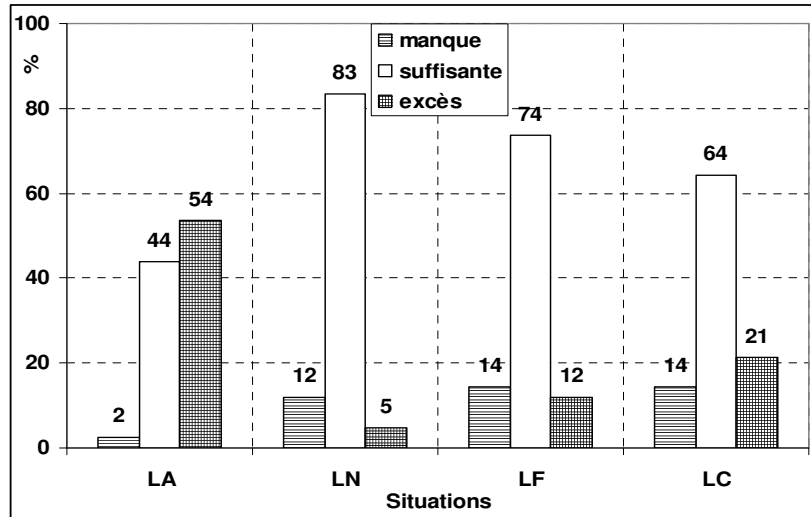


Figure 4.32. Distribution des réponses à la perception de la luminosité du document imprimé pour les quatre situations.

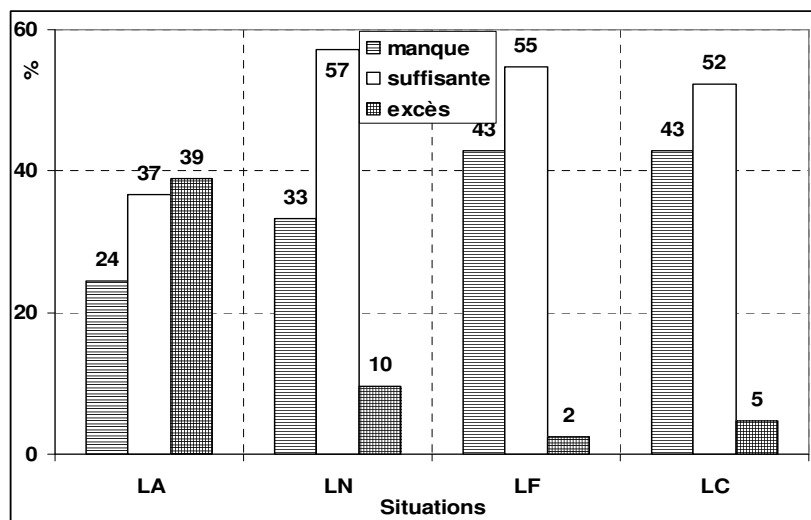


Figure 4.33 Distribution des réponses à la perception de la luminosité de l'écran pour les quatre situations.

Dans les figures 4.32 et 4.33 le pourcentage de réponse "manque de lumière sur la tâche" augmente et, en même temps le pourcentage de réponse "excès de lumière sur la tâche" diminue, quand on passe de la situation de lumière artificielle pure (la plus sombre) aux situations plus claires de lumière naturelle avec la lampe sur pied (on passe de 24% à 43%). Dans les deux cas, pour le document (figure 4.32) et l'écran (figure 4.33), c'est le contraste entourage - tâche qui est le facteur principal. La figure 4.34 montre que ce contraste augmente effectivement entre la situation LA et la situation LC (le graphique montre la valeur moyenne de ce contraste pour chaque situation).

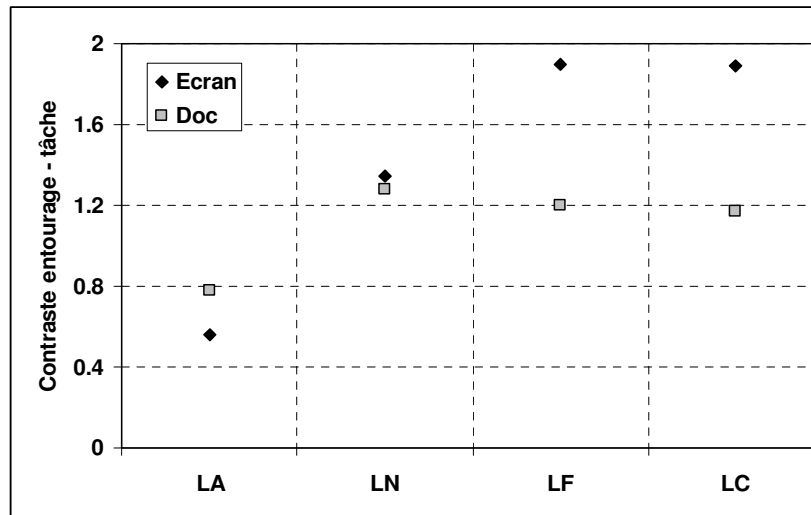


Figure 4.34. Variation du contraste "entourage – tâche" pour chacune des quatre situations, dans le cas de l'écran et du documents.

Cette variation de contraste, aussi révélée par le graphique de la figure 4.6. (distribution des éclairagements par situation) est en relation avec la quantité globale de lumière qui a augmenté dans le sens suivant : la lumière artificielle (LA) était la situation la plus sombre, la lumière naturelle (LN) était nettement plus claire; enfin les deux situations de mélange de lumière naturelle et artificielle (LF et LC) étaient toutes deux les plus claires.

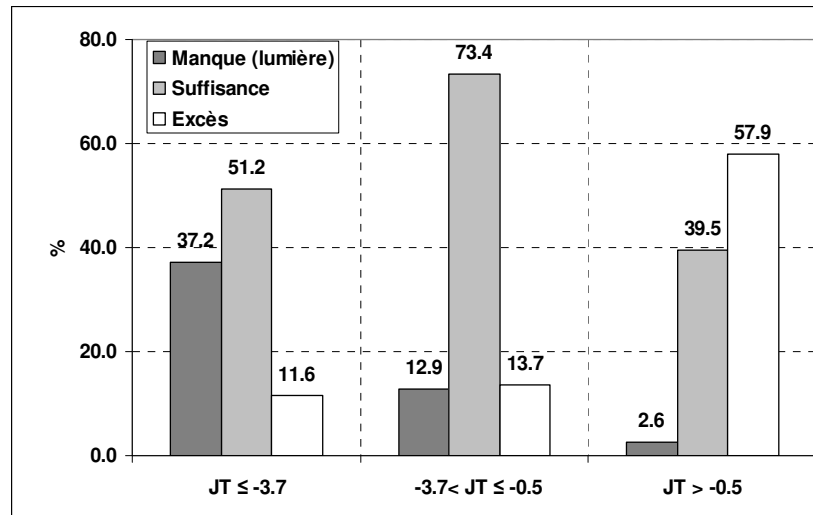
Validation en terme de J-index

Il s'agit de l'indice décrivant la perte de performance visuelle, synonyme d'un sentiment d'inconfort visuel (selon les hypothèses initiales décrites dans le paragraphe 2.2.1) en relation avec le besoin en lumière. Pour décrire le manque ou l'excès de lumière sur la tâche nous avons introduit un autre indice JT déduit du J-index: pour simplifier on pose $J(L_T)$ la valeur de J-index pour une luminance de tâche L_T .

$$JT = \begin{cases} J(L_{Opt}) - J(L_T), & \text{si } L_{Opt} > L_T \\ J(L_T) - J(L_{Opt}), & \text{si } L_{Opt} \leq L_T \end{cases} \quad (\text{eq 4.4})$$

Avec L_{Opt} la luminance de la tâche minimisant J-index. En effet, plus J-index est élevé, plus il est jugé mauvais.

L'équation 4.4 montre que si la luminance réelle de la tâche est inférieure à la luminance optimale, JT devient négatif et cela signifie qu'il y a un manque de lumière. Cet indice JT décrit donc la perte de performance visuelle imputable à un manque ou un excès de lumière relatif à la tâche.



	JT ≤ -3.7	-3.7 < JT ≤ -0.5	JT > -0.5	Totaux
Manque	61	16	1	78
Adéquation	84	91	15	190
Excès	19	17	22	58
Totaux	164	124	38	326

$\chi^2 = 73.2, df=4, p << 1\%$.

Figure 4.35. Tableau croisé montrant la relation significative entre la perception de la luminosité et l'indice JT.

On voit que cet indice JT permet de bien distinguer l'excès de lumière (58% si JT > -0.5) ainsi que l'adéquation de lumière (73% si $-3.7 < JT \leq -0.5$), mais moins le manque de lumière (37% si JT ≤ -3.7), ce qui était le contraire avec le contraste (voir figure 4.27). Cet indice JT explique donc partiellement le sentiment de luminosité, ce qui signifierait que l'acuité visuelle joue un rôle pour ce sentiment. Mais le tableau croisé ne représente pas une preuve de cette relation.

Influence de la température de couleur sur la luminosité

Le sentiment de luminosité pouvait-il varier avec les températures de couleurs, c'est ce que laisse supposer le diagramme de Kruthoff, du moins pour la lumière artificielle.

Nous avons mis en évidence une corrélation significative de -0.284 entre la température de couleur mesurée au niveau des yeux et le sentiment de luminosité de l'écran et du document imprimé. La corrélation est de -0.201 si on prend le sentiment de luminosité de l'écran seul, et de -0.409 pour le document imprimé seul. Pour ces mêmes cas, on a constaté une corrélation très significative entre cette température de couleur et le contraste "tâche-entourage" (0.429 pour l'ensemble des données, 0.765 pour le document imprimé seul et 0.411 pour l'écran seul). Cela signifie que les corrélations trouvées entre la température de couleur et le sentiment de luminosité sont dues essentiellement à l'association circonstancielle entre la température de couleur et le contraste.

On en déduit que, dans cette étude, il n'a pas été possible de démontrer une relation avec la température de couleur.

4.2.2.4. *Eblouissement*

Comme nous l'avons mentionné au chapitre I, l'éblouissement représente un paramètre important du confort visuel, éventuellement le plus important.

Les sujets devaient répondre à la question suivante:

Globalement, l'ambiance lumineuse vous paraît-elle :

pas éblouissante(1) – un peu éblouissante(2) – éblouissante(3) – très éblouissante(4) ?

Dans la plupart des cas, les sujets ont eu, selon leurs propres dires, de la peine à répondre à cette question. En effet, quand plusieurs sources lumineuses, de luminosité et de températures de couleurs différentes, sont placées dans le champ visuel, il est difficile d'avoir un avis sur l'éblouissement global qu'elles engendrent. Comme le montre le graphique 4.33, les sujets ont exprimé cette difficulté en répondant de manière très peu variée à la question: seulement 5% des réponses mentionnaient l'éblouissement (peu = 31% , très = 0 %) et 63% pas d'éblouissement. Pourtant, on pouvait supposer que la lampe sur pied devait engendrer un certain éblouissement.

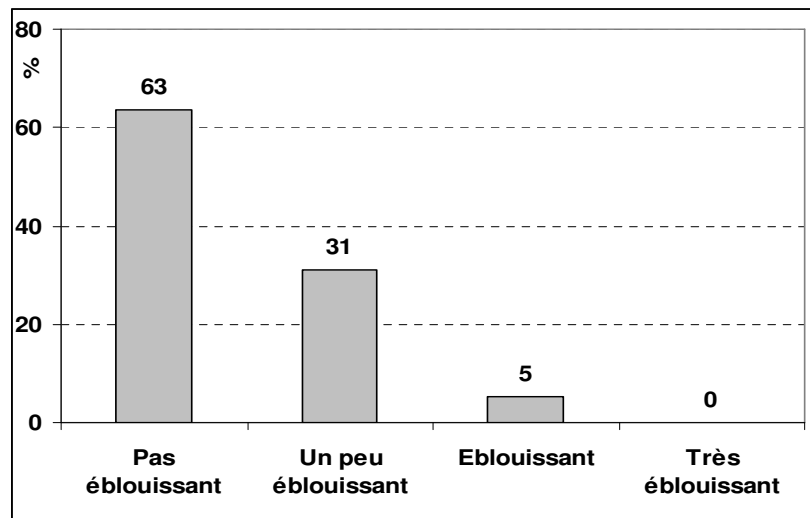


Figure 4.36 Distribution des 167 réponses à l'éblouissement.

Ce manque de nuances dans les réponses empêche d'étudier réellement l'éblouissement, du moins par le fait que, dans cette formulation, les corrélations avec tout autres facteurs étaient faibles voire non significatives.

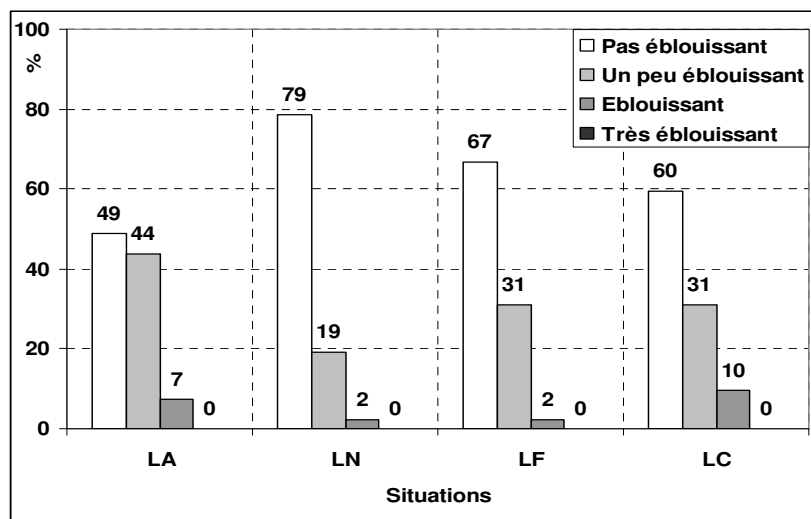


Figure 4.37. Distribution des réponses à l'éblouissement en fonction des quatre situations proposées aux sujets.: LA = lumière artificielle pure, LN = lumière naturelle pure, LF = lumière naturelle + lampes froides et LC = lumière naturelle + lampes chaudes.

On voit sur ce graphique que les sujets ont répondu positivement à cette question en fonction de la présence de la lumière artificielle. Celle-ci souffre en général d'un a priori négatif et on peut penser que c'est sur cette base que les sujets ont répondu. Dans la situation n°1, avec de la lumière artificielle pure, on avait 49% de sujets non éblouis contre 79% dans le cas de la lumière naturelle pure. La différence est statistiquement significative, (cf le tableau ci-dessous).

	LA	LN	LF	LC
LA	0	2.99	1.69	1.01
LN	2.99	0	1.25	1.93
LF	1.69	1.25	0	0.67
LC	1.01	1.93	0.67	0

Tableau 4.2 Liste des tests t pour la comparaison des pourcentages des sujets non éblouis en fonction des situations, comparaisons faites deux par deux. Les tests figurant en caractères gras représentent les cas significatifs.

On voit sur ce tableau que seule la différence entre les situations de lumière artificielle pure et de lumière naturelle pure est significative. Toutes les autres différences ne sont pas significatives, toutefois, la figure 4.37. montre que les deux autres situations, mélangeant lumière artificielle et naturelle, engendrent un pourcentage de non-éblouis intermédiaires (67 et 60% se trouvant bien entre 49% et 70%). Cela montre bien que c'est la présence de la lumière artificielle qui engendre une insatisfaction.

Une autre question peut être logiquement associée à l'éblouissement, celle concernant le sentiment global d'une luminosité élevée, forte ou intense.

Globalement, la luminosité vous paraît-elle:

très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7)?

Comme pour l'éblouissement, les sujets ont eu de la peine à répondre à cette question étant donné le grand nombre de sources différentes. C'est ce que laisse supposer la distribution des réponses à cette question. En effet, les sujets ont répondu à 74% que cette luminosité était bonne, ce qui est un pourcentage plus élevé que dans le cas de l'absence d'éblouissement.

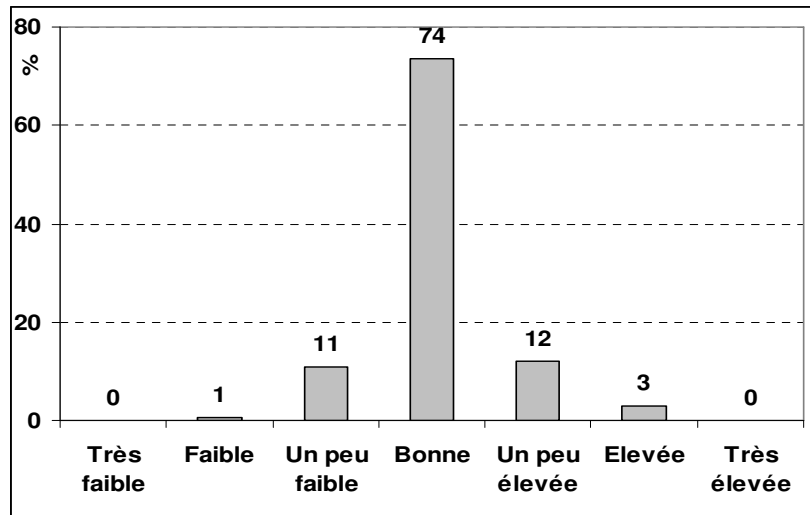
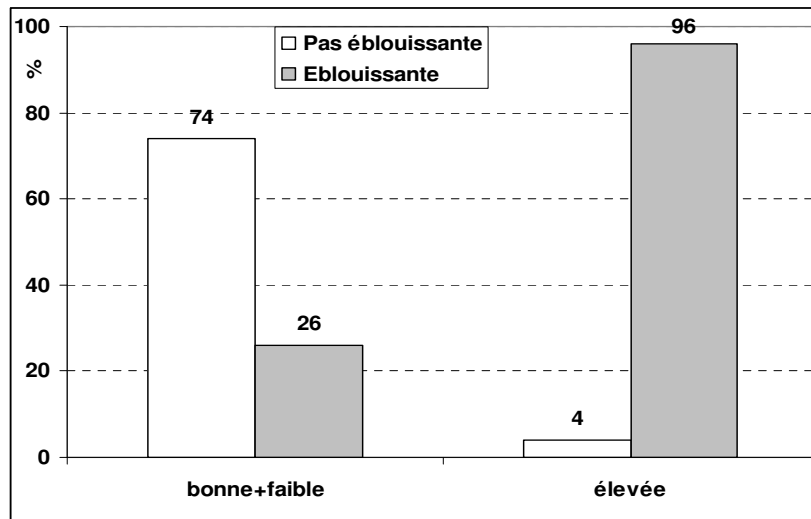


Figure 4.37 Distribution des réponses des sujets à la question concernant le sentiment de luminosité globale.



	Luminosité faible + bonne	Luminosité élevée	Totaux
Pas éblouissante	105	37	142
Eblouissante	1	24	25
Totaux	106	61	167

$\chi^2 = 44.9, df=1, p << 1\%$

Figure 4.39. Tableau croisé mettant en relation la perception de luminosité globale et celle de l'éblouissement global.

On voit dans ce tableau qu'il y a bien équivalence entre le sentiment d'avoir beaucoup de lumière et celui d'être ébloui.

4.2.2.5. Acuité visuelle et perception de la luminosité

Comme décrit le paragraphe § 2.2.1, la performance visuelle joue un rôle dans le confort visuel. C'était l'hypothèse de l'indice J que nous avons considéré plus haut. Dans cette expérience, il s'agissait de tester directement cette relation entre performance d'acuité et perception de la luminosité. Cette acuité visuelle a été évaluée par l'intermédiaire du logiciel de test sur écran, sous la forme d'une courbe "acuité – contraste". Dans un premier temps, il fallait valider le modèle d'acuité – contraste (cf. équation 4.5), puis, dans un deuxième temps, étudier les variations de l'acuité estimée par ce test. Dans cette expérience, chaque sujet a passé 9 tests: un test dans une situation standard à faible lumière d'ambiance, puis deux tests pour chacune des quatre situations proposées. Avec 42 sujets, cela représentait, en tenant compte des données manquantes, un total de 376 tests.

Validation du modèle acuité – contraste sur écran

Pour valider le modèle acuité-contraste (équation 2.26 et 4.5), le test F-Snedecor (test mentionné dans l'annexe A.1.5) a été réalisé pour l'ensemble de ces 376 tests visuels, ce qui fait 376 tests statistiques. Si alors on considère un seuil de rejet de 5%, parmi les 376 cas, le test statistique devrait en rejeter un pourcentage (PR) comparable à ces 5%.

Rappelons l'équation du modèle:

$$\text{Ln}(C) = \text{Ln}(C_0) \left(1 - \frac{A}{A_m} \right) \quad (\text{eq 4.5})$$

La valeur calculée du pourcentage de rejet de PR est de 3.5, ce qui est très proche des 5%. Le modèle (4.5) exprime donc bien la relation entre l'acuité et le contraste caractère – fond.

La figure 4.40 montre deux exemples de tests sur écran avec l'évaluation des paramètres du modèle dans les deux cas.

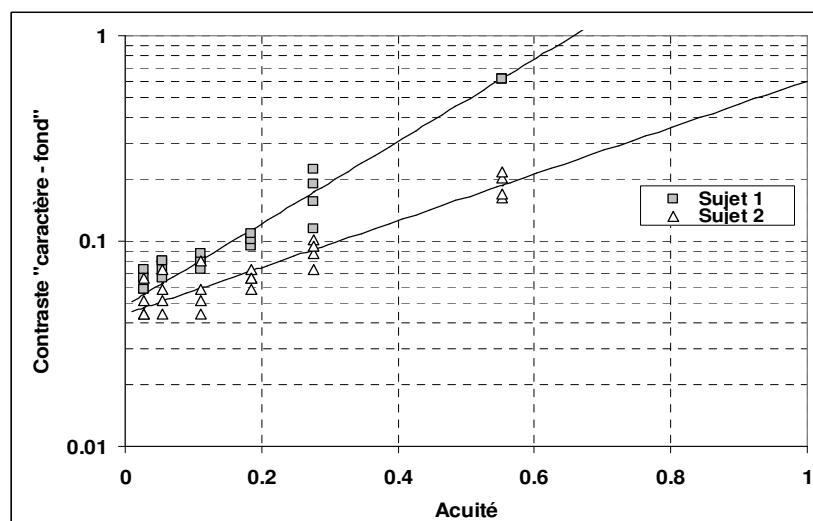


Figure 4.40. Illustration de deux cas de courbes acuité – contraste établies pour deux sujets d'âges différents (sujet 1= 54 ans, sujet 2=22 ans).

Dans la figure présentée ci-dessus, les paramètres du modèle ont été estimés pour chaque sujet:

sujet n°1 : $A_m \approx 1.19 \pm 0.04$ et $C_0 \approx 0.044 \pm 0.003$ (corrélation= 0.968);

sujet n°2 : $A_m \approx 0.66 \pm 0.01$ et $C_0 \approx 0.048 \pm 0.003$ (corrélation = 0.996).

On voit que les points se retrouvent bien sur les courbes théoriques, avec de très bonnes corrélations. Le sujet n°1 (le plus âgé) a une acuité plus faible que le sujet n°2 (0.66 contre 1.19). Cela signifie, d'après la figure 4.40, qu'il doit disposer d'un contraste plus fort pour atteindre la même performance d'acuité que le sujet n°2.

Un autre aspect de la validation du test concerne la comparaison des acuités avec celles obtenues par d'autres tests visuels classiques. Rappelons que l'un des tests visuels passés au début de l'expérimentation pour définir le profil ergophtalmologique des sujets était le test d'acuité sur écran dans une situation standard – non tributaire de variations dues à la lumière naturelle et avec une lumière ambiante très basse (de l'ordre de 5 lux, conditions approchant celles du test de référence C45).

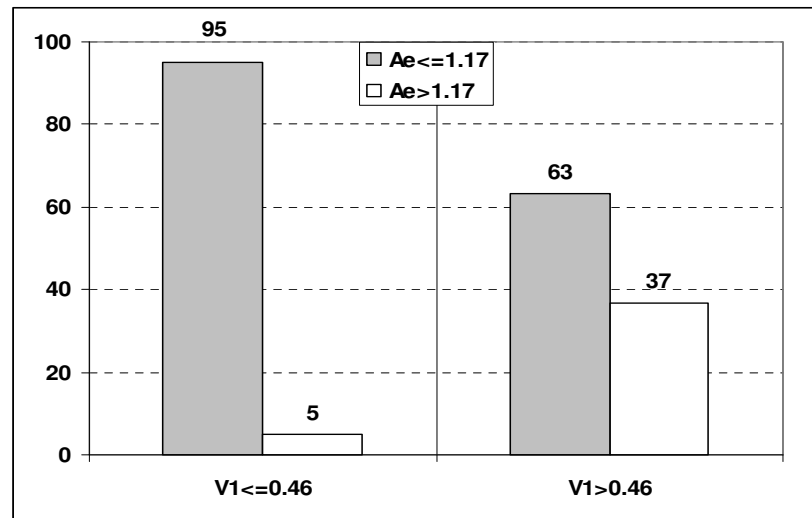
Nous avons estimé l'acuité sur écran des 42 sujets dans ces conditions, à l'aide du modèle n°1. Il s'agissait notamment de mettre en évidence une relation entre les résultats de ces tests en condition standard et les résultats des tests du C45. Cependant la comparaison entre les deux tests ne peut se faire directement puisque le test du C45 (cf. paragraphe 2.1.4.4) se fait en contraste négatif contrairement à celui fait avec l'écran.

Etant donné que le résultat du test C45 de référence est une courbe acuité – luminance (du caractère), deux nouveaux paramètres (p , $V1$) ont été introduits pour décrire la courbe acuité-contraste sur écran. Le modèle mathématique représentant cette courbe est:

$$A = p \ln(L_c) + V1 \quad (\text{eq 4.6})$$

où A est l'acuité; L_c , la luminance du caractère; p , la pente de la courbe et $V1$ l'acuité obtenue si la luminance du caractère était fixée à 1 cd/m^2 .

L'acuité $V1$ du test C45 a donc été comparée avec l'acuité estimée (Ae) pour le test sur écran. La corrélation entre les deux variables était de 0.328 pour un effectif de 39 points (3 points manquants). Cette corrélation met donc en évidence une relation significative entre les deux tests.



	V1 ≤ 0.46	V1 > 0.46	Totaux
Ae ≤ 1.17	19	12	31
Ae > 1.17	1	7	8
Totaux	20	19	39
$\chi^2 = 6.1, df=1, p<5\%$			

Figure 4.41 Tableau croisé mettant en relation l'acuité estimée par le test sur écran et l'acuité estimée par le test C45.

Ce tableau croisé montre qu'une acuité $V1$ du C45 inférieure ($V1 \leq 0.46$) impliquait assez nettement (95%) une faible performance au test sur écran ($Ae \leq 1.17$). Par contre, dans le cas contraire, le résultat était nettement plus partagé (63%, proche de 50%). Le χ^2 (6.1) était d'ailleurs faiblement significatif.

Comme pour l'ensemble des tests d'acuité, une certaine relation entre les deux tests était logiquement attendue. Leur faible association peut s'expliquer par des conditions lumineuses assez différentes, notamment en terme de définition et d'adaptation. En effet dans le cas du test sur écran, les symboles apparaissent en sombre sur un fond relativement lumineux (100 cd/m²) et de surface importante (17 pouces) tandis que dans le cas du test C45 les symboles apparaissent sur un fond sombre (de l'ordre de 0.1 cd/m²), de surface plus restreinte (15 °) entourée d'une zone d'adaptation de 10 cd/m², (réf. [64]) . D'autre part, dans le test C45 le symbole utilisé était l'anneau de Landolt qui est légèrement différent du crochet de Snellen du test sur écran.

Pour valider cette relation entre les deux tests, nous avons également analysé l'effet de l'âge (Ag) qui se manifeste non seulement par une diminution de l'acuité mais aussi par des variations de sensibilité à la lumière. Bien que notre groupe comportait peu de sujets d'âge supérieur à 35 ans, il a été effectivement mis en évidence une corrélation négative significative de -0.320 entre l'âge et l'acuité estimée par le test sur écran.

Nous avons également pu mettre en évidence une corrélation très significative de 0.406 avec l'acuité en vision de près établie par l'intermédiaire du test Titmus visiotest (utilisé par certains médecins du travail pour établir le profil des sujets).

L'intérêt de ce test d'acuité pour l'expérience est également mis en évidence par deux expériences annexes qui avaient permis de démontrer sa sensibilité aux conditions lumineuses d'un local déterminant notamment la luminance du fond (réf. [13] [29]).

En conclusion, l'ensemble de ces observations valident l'aptitude du test sur écran à rendre compte de la relation qui, pour un sujet donné, relie l'acuité à sa sensibilité au contraste et à la lumière.

La figure 4.42 présente la distribution de l'acuité estimée A_e qui, pour les 42 sujets de l'expérience, varie entre 0.68 et 1.46.

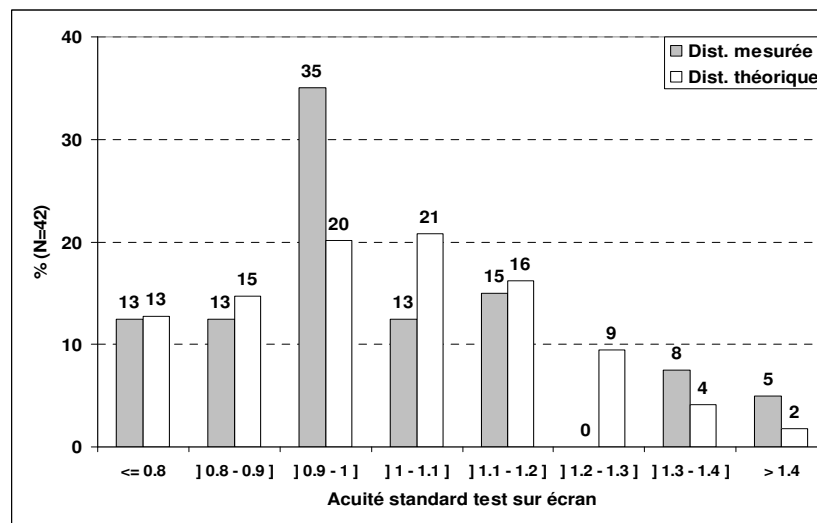


Figure 4.42 Distribution de l'acuité A_e du test sur écran (Dist. mesurée) pour les 42 sujets de l'expérience, comparée la distribution normale théorique correspondante de moyenne 1.01 et d'écart-type 0.19 (Dist. théorique). On voit que les distributions sont approximativement normales.

Variations de l'acuité (A_e) estimée du test sur écran

Dans le paragraphe précédent, nous avons étudié le test sur écran réalisé en conditions standard, ce qui a permis de valider l'utilité de ce test pour contribuer à rendre compte des réactions à la lumière. Au cours de l'expérience dans le local prototype, les sujets ont passé ce test dans quatre ambiances lumineuses, trois d'entre elles impliquant des variations de lumière naturelle susceptibles d'influencer l'acuité.

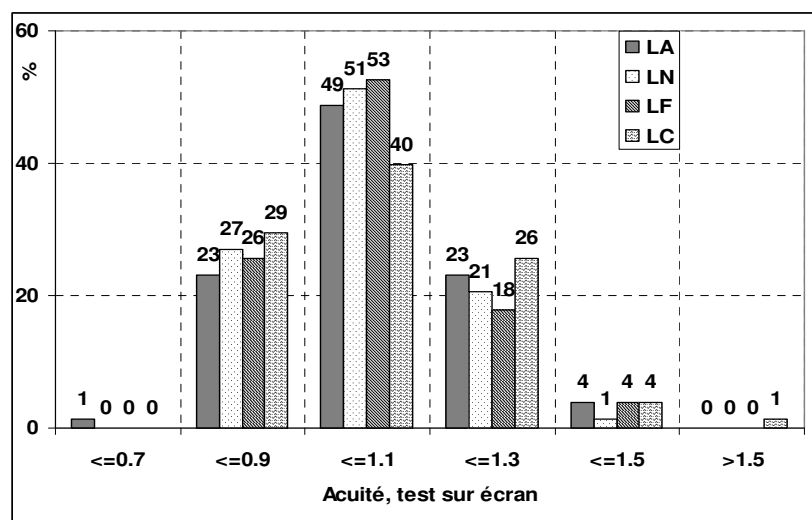


Figure 4.43. Distribution des acuités mesurées par le test sur écran, en fonction des quatre ambiances lumineuses, soit 78 acuités mesurées par situation (39 sujets x2). Il n'y a pas de différences significatives entre ces 4 distributions.

Ce graphique montre que les quatre ambiances lumineuses n'ont pas eu d'influence sur l'acuité des sujets, estimée par le test sur écran.

Si les distributions de luminance correspondant à ces ambiances différaient bien (cf. § A-5) entre elles, les éclairagements avaient relativement peu varié pendant l'expérience (cf. § 4.2.1.1). La question était alors de savoir si cette absence de variation d'acuité était due à la faible variation des éclairagements ou si cette acuité n'a vraiment pas été influencée par la variation des conditions photométriques qui caractérisaient l'environnement lumineux de l'écran. Il faut rappeler que tous les tests se sont faits avec une luminance de l'écran fixée à 100 cd/m² et que l'influence des variations de conditions lumineuses sur la luminance de l'écran étaient très faibles (cf. § 4.2.1.1).

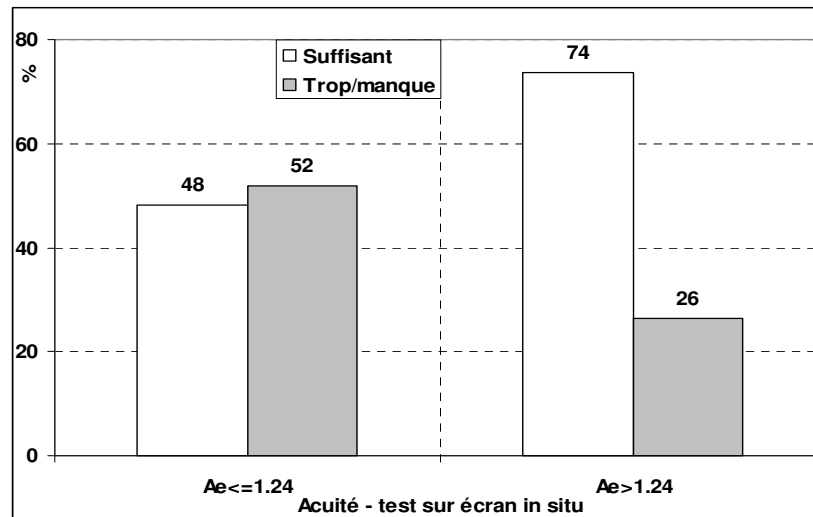
Acuité et perception lumineuse

Une des hypothèses principale de l'étude du confort visuel était que la perception de luminosité était liée à l'exigence d'acuité. En d'autres termes, nous avons supposé que plus l'acuité d'un sujet était bonne, plus il était satisfait de la luminosité, et que, inversement, un manque ou un excès de lumière était associé à une acuité plus faible.

Pour valider cette hypothèse, nous avons examiné la relation entre les réponses des sujets au sentiment de luminosité et leur performances établies, d'une part, pour les deux tests d'acuité sur écran, administrés, l'un in situ et l'autre, lors de la première séance et, d'autre part, pour le test C45 de référence de cette même première séance.

La première comparaison avait pour but de déterminer l'existence d'une relation directe entre acuité et réactions subjectives à la lumière. Avec la deuxième et troisième comparaison, il s'agissait de trouver une relation indirecte avec un paramètre du profil visuel du sujet (celui déterminé par le test sur écran en condition standard et celui déterminé par le test C45).

En terme de corrélation, aucune relation significative n'est apparue. Par contre, les tableaux croisés ont mis en évidence une relation faible mais significative.

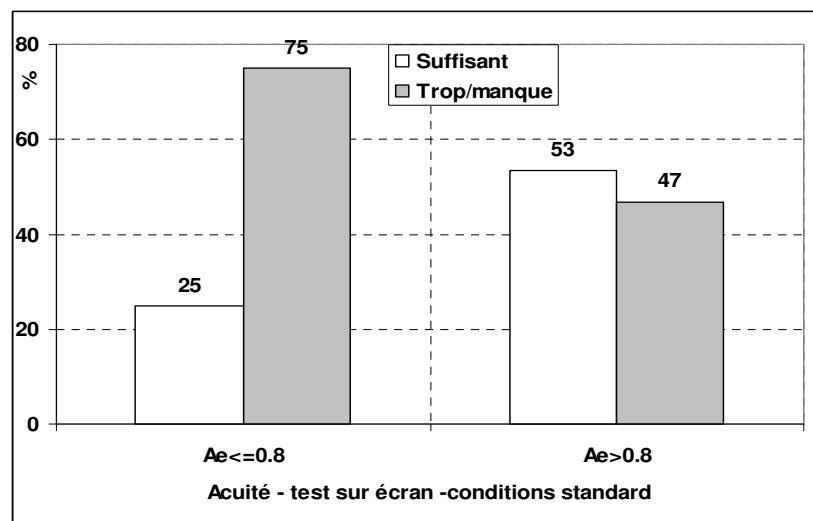


	Ae ≤ 1.24	Ae > 1.24	Totaux
Lum. écran suffisante	140	14	154
Excès / manque	151	5	156
Totaux	291	19	310

$\chi^2 = 4.7, df=1, p<5\%$

Figure 4.44. Tableau croisé montrant une relation significative entre l'acuité sur l'écran mesurée in situ et la perception de luminosité de cet écran.

La signification est assez faible, mais on voit surtout que 74% des sujets ayant une bonne acuité (Ae>1.24) trouvaient que la luminosité de l'écran était suffisante.



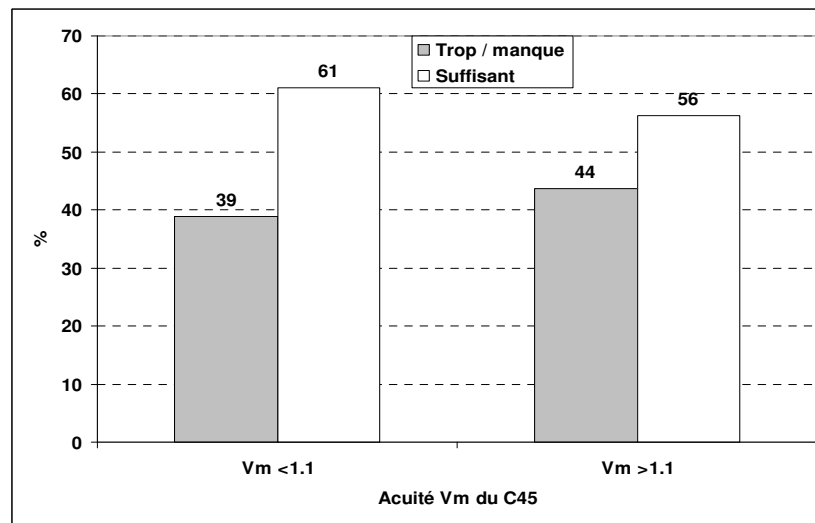
	Ae ≤ 0.8	Ae > 0.8	Totaux
Lum. écran suffisante	10	144	154
Excès / manque	30	126	156
Totaux	40	270	310

$\chi^2 = 11.2, df=1, p<<1\%$

Figure 4.45. Tableau croisé montrant une relation significative entre l'acuité du test sur écran mesuré en condition standard et la perception de luminosité de l'écran in situ.

Dans ce cas-là, 75% des sujets ayant une faible acuité (Ae ≤ 0.8) ont trouvé l'écran soit sombre soit clair. De même 53% (significativement différents de 50%) des sujets ayant une meilleure acuité ont trouvé la luminosité de l'écran suffisante.

En ce qui concerne l'acuité Vm du test du C45, aucune tendance n'est apparue comme en atteste le tableau croisé de la figure 4.46.



	Vm ≤ 1.1	Vm > 1.1	Totaux
Lum. écran suffisante	53	83	136
Excès / manque	83	107	190
Totaux	136	190	326

$\chi^2 = 0.72, df=1, p=39\% \gg 5\%$

Figure 4.46. Tableau croisé montrant une relation non significative entre l'acuité du test C45 et la perception de luminosité de l'écran.

4.2.3. Synthèse des résultats du local prototype

L'expérience dans ce local prototype a permis de mettre en évidence la contribution d'un certain nombre de paramètres de l'équation du confort visuel, et ceci malgré des ambiances lumineuses à priori plutôt bonnes, avec relativement peu de variations des luminances et des éclairagements.

4.2.3.1. Température de couleur, effet Kruithoff

L'effet Kruithoff n'a pas pu être vérifié par cette expérience. Cela peut s'expliquer par la situation expérimentale peu favorable pour cette validation. On peut en effet supposer que le mélange des diverses sources de lumière (notamment lumière naturelle et lumière artificielle) ainsi que des charges thermiques, le plus souvent élevées, ont gêné les sujets pour répondre à cette question. Kruithoff ayant fait une expérience dans laquelle les sujets ne disposaient que d'une seule source de lumière artificielle (c'était ainsi qu'il pouvait faire varier la température de couleur), il était alors plus facile à ses sujets de se prononcer.

Dans notre expérience, il semblerait que les sujets aient assimilé le sentiment de "froid" à l'inconfort général associé à la présence de tubes fluorescents et le sentiment de "chaud" au confort associé à la lumière naturelle. On peut supposer que d'autres facteurs entrent en ligne de compte dans le sentiment de chaleur / froideur :

- la brillance des parois du local peut amener un sentiment de froideur (fait penser aux hôpitaux, ou aux salles de bains) ;
- les couleurs des parois ;
- l'encombrement du local ;
- les dimensions du local ;
- les conditions météorologiques,...

Alors que ces différents paramètres ont été souvent mentionnés par des ingénieurs éclairagistes et des psychologues (réf. [91], [93]), une expérience ultérieure pourrait souligner l'importance relative de ces paramètres.

4.2.3.2. Réglages des luminaires

L'étude a permis de montrer une relation entre le réglage des luminaires et le profil du sujet (défini par la valeur L_m du test de référence C45). Cela signifie qu'on pourrait, en théorie, prévoir comment un sujet va réguler sa lumière en fonction de ses propres besoins en lumière. Mais il faudrait compléter cette expérience en exposant les sujets à des situations plus différenciées.

4.2.3.3. Perception de la luminosité

L'expérience a mis en évidence deux paramètres importants influençant la perception de la luminosité : 1) le contraste entre l'écran ou le document imprimé et l'environnement; 2) le profil du sujet à travers la luminance physiologique L_m du test C45.

Concernant le contraste, il a été possible de déterminer une fourchette de confort, défini comme le rapport entre la luminance moyenne du champ visuel et la luminance de la tâche. En effet, quand le contraste variait entre 0.85 et 1.53, il y avait 71% de satisfaction. Il faut cependant rappeler que, d'une part, la luminance de la tâche avait très peu varié et que, d'autre part, il existait des corrélations entre variables photométriques, ce qui rendait impossible d'évaluer l'effet d'un changement de la luminance de la tâche. Cette fourchette est compatible avec le comportement des personnes travaillant sur écran. En effet, on observe sur le terrain beaucoup de sujets descendant les stores et allumant la lumière artificielle. Ces actions permettent en fait aux opérateurs d'avoir un entourage convenable (ni trop sombre, ni trop clair) par rapport à leur écran qui a lui-même une luminosité relativement réduite, même réglée au maximum (env. 100 cd/m^2).

Enfin, on peut se demander s'il n'aurait pas fallu varier la luminance de l'écran. Mais comme déjà mentionné, l'évaluation des effets spécifiques des rapports de luminance entre la tâche et son environnement, ce qui nécessite d'éliminer les facteurs confondant, a été envisagée dans l'expérience de laboratoire.

4.2.3.4. Effet d'éblouissement

La question relative à l'éblouissement, de même celle concernant l'appréciation globale de lumière, a posé des difficultés aux sujets. Comme pour la question concernant la température de couleur, on a constaté que les réponses dépendaient essentiellement de la présence de la lumière artificielle. Cette dernière était perçue d'emblée comme mauvaise, éblouissante ou froide.

On conclut aussi de cette expérience que, pour étudier l'effet d'éblouissement, il faut poser des questions plus précises, susceptibles d'amener les sujets à se concentrer sur la question posée. Par exemple, le terme d'éblouissement global, était trop difficile à appréhender. Dans l'expérience de laboratoire, nous avons tenu compte de ces observations.

Il a été décidé de poser la même question sur l'éblouissement séparément pour chaque source de lumière, en obligeant les sujets à bien regarder l'écran. Cette question devenait alors:

En regardant l'écran, la lumière de la "source x" vous paraît-elle :

pas gênante(1) – un peu gênante(2) – gênante(3) – éblouissante(4) – très éblouissante(5)?

Comme le montrent les résultats décrits plus loin, les sujets ont pu répondre avec une aisance suffisante à cette question.

4.2.3.5. Acuité visuelle et confort

Une estimation de l'acuité A_e a nécessité de valider au préalable le modèle acuité-contraste sur écran. C'est ainsi que cette acuité (A_e) a pu être mise en relation avec les valeurs relevées pour d'autres tests visuels utilisés pour établir le profil des sujets dont le test C45 de référence. Ce test étant validé, il était le seul à pouvoir être utilisé in situ pour vérifier l'effet de l'environnement lumineux. Nous avons constaté que cette acuité, ainsi mesurée, n'a pas varié avec les conditions lumineuses. Deux hypothèses pouvaient

expliquer cela: soient les luminances et éclairagements n'ont pas varié suffisamment entre les quatre situations, soit la luminance de l'écran était trop favorable.

Finalement, le fait remarquable est la relation – certes faible – qui a pu être mise en évidence entre l'acuité des sujets et leur sentiment de luminosité.

En conclusion:

Des conditions caractérisées par de faibles variations d'éclairagement associées à des différences importantes de configuration du champ visuel ont, tout d'abord, permis d'objectiver des réactions de gêne à la lumière, sans modification importante de la performance d'acuité, mais en relation avec le profil visuel des sujets établi par des tests ergophtalmologiques de référence.

Un autre aspect révélé par cette expérience est la nature très nuancée des réponses des sujets aux variations de distributions de lumière, celles-ci étant néanmoins influencées par le climat et la nature des sources de lumière.

Enfin, le paramètre le plus important qui a déterminé le sentiment de luminosité est le contraste entre la luminance fixe de l'écran et celles, variables, de son environnement. Cet effet sera repris dans l'expérience de laboratoire dans des situations plus différenciées faisant intervenir notamment des variations de luminance et de contraste au niveau de la tâche.

4.3. Expérience de suivi

4.3.1. Luminosité et éblouissement

Rappelons que (cf. § 3.4) deux sujets - un technicien de laboratoire et un chercheur doctorant - affectés à deux services différents et dont le principal outil de travail était un écran devaient répondre en moyenne cinq fois par jour aux questionnaires relatifs à leurs impressions visuelles. Considérées dans leur ensemble, nous avons observé que les réponses des sujets étaient peu nuancées, et finissaient souvent par correspondre à un avis neutre. On pourrait l'expliquer par le fait que, dans cette expérience, il manquait un opérateur.

La tendance à se prononcer pour la neutralité des avis est un phénomène connu dans la technique du questionnaire. Dans notre cas, on peut supposer que les sujets, livrés à eux-mêmes, finissaient trop souvent par répondre de manière automatique. Mais on doit aussi invoquer des effets d'adaptation et d'accoutumance.

Cette problématique est illustrée par la distribution des réponses des deux sujets pour deux questions importantes : le sentiment de luminosité de l'écran (qui devrait varier nettement quand le contraste entre l'écran et l'entourage varie) et le sentiment d'éblouissement provenant de la fenêtre. Dans ce cas, les mesures d'éclairagements ont montré que d'importantes variations de lumière ont tout de même eu lieu au cours de l'expérience.

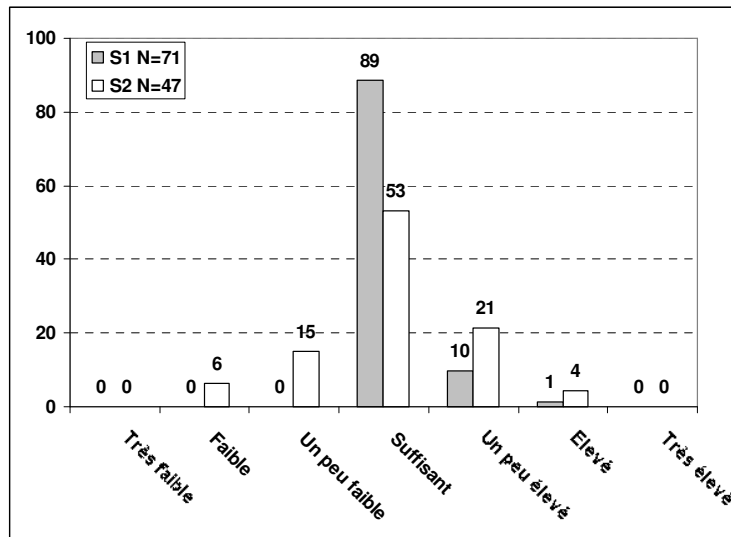


Figure 4.47. Distribution des réponses des sujets à la question concernant leur perception de la luminosité de leur écran.

On voit sur la figure que les réponses des sujets sont assez peu nuancées et cela particulièrement pour le sujet n°1 qui a répondu "suffisant" dans 89% des cas.

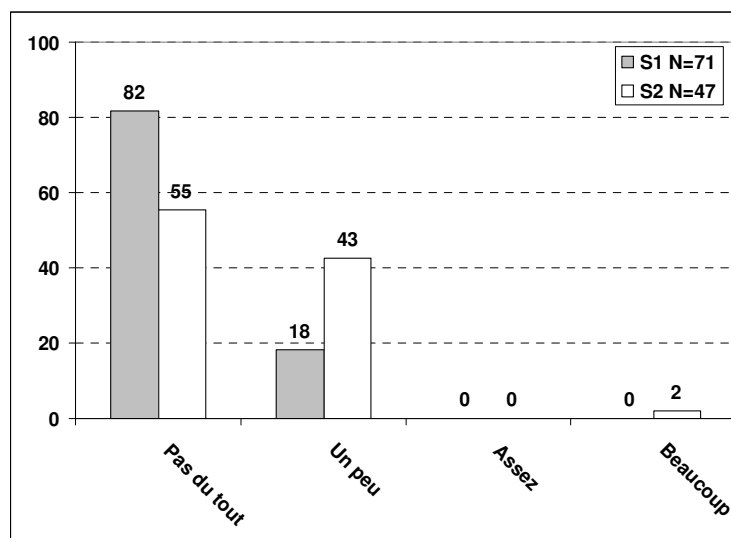


Figure 4.48. Distribution des réponses des sujets à la question concernant leur sentiment d'éblouissement procuré par la fenêtre.

Pour cette question, les réponses des sujets sont également peu nuancées : la plupart du temps les deux sujets ne se déclaraient pas éblouis. Cependant, le graphique montre que le sujet n°2 a répondu de manière plus nuancée que le sujet n°1.

Le graphique 4.48 montre la distribution des éclaircissements, mesurés au moment même où les sujets répondaient aux questionnaires.

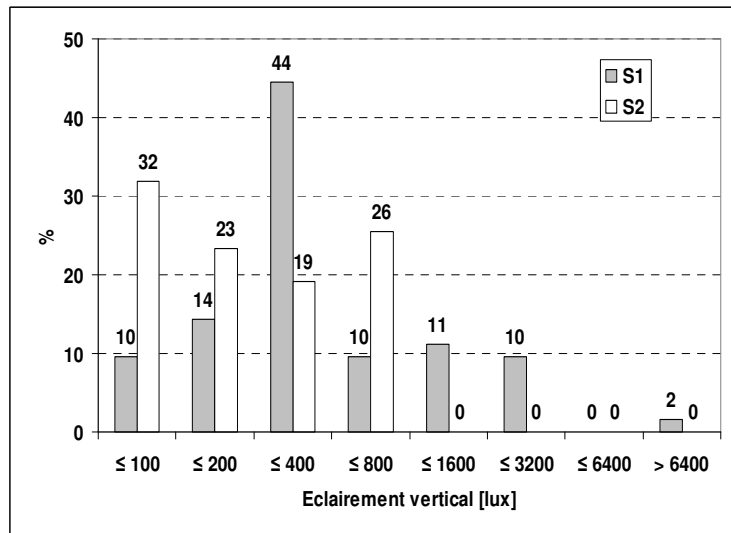


Figure 4.49. Distribution des éclairagements verticaux mesurés au moment où les sujets répondaient aux questions.

En considérant les valeurs extrêmes, on peut considérer que la variation des éclairagements était importante, puisqu'il a varié de 32 à 9000 lx pour le sujet 1 et de 23 à 600 lx pour le sujet 2. Cependant, en considérant les distributions, on pourrait penser que c'est surtout un manque de lumière qui a accentué chez le sujet No 2 l'effet des variations du sentiment de luminosité. Nous n'avons cependant trouvé aucune relation entre le sentiment de luminosité et l'éclairage.

Cette partie de l'expérience n'a donc pas vérifié les résultats attendus, à savoir, l'établissement d'une corrélation entre variations de lumière et réactions subjectives instantanées. Elle nous a, par contre, permis d'améliorer la conception du reste de l'expérience concernant la perception visuelle des sujets. En effet, les questions auraient dû être plus précises et bien explicitées par un opérateur présent; d'autre part, la seule mesure de l'éclairage vertical prise depuis la potence, à l'arrière du sujet (cf. figure 3.22 dans § 3.4.1) ne donnait pas d'information suffisante sur la distribution réelle de lumière, comme cela a été démontré dans l'expérience du local prototype. Autrement dit, les conditions lumineuses proposées devaient être mieux contrôlées, surtout au niveau du choix des bons paramètres photométriques.

4.3.2. Plaintes visuelles

On peut rappeler que le travail sur écran a surtout donné lieu à de très nombreuses études qui ont relevé l'importance de plaintes visuelles en terme de signes d'asthénopie et d'expression de gêne à la lumière (réf. [51], [59], [60], [61], [62], [65], [66], [67], [72], [73], [75]) et leur relation avec l'intensité et la durée du travail. Certains auteurs ont également montré une relation quotidienne et hebdomadaire entre les variations de ces plaintes et certains paramètres physiologiques dont en particulier les mécanismes d'accommodation et de convergence. Par contre, on n'a pas, à notre connaissance, étudié une relation quotidienne entre plaintes et variation des conditions lumineuses. Pourtant, il paraît évident que de mauvaises conditions lumineuses accentuent l'effet de l'intensité de la tâche d'exploration. Le problème est de savoir si l'expression de la gêne à la lumière est en correspondance avec l'effet sur la performance. En effet des analyses multifactorielles de terrain laissaient supposer un effet de masque des signes de gêne par les signes d'asthénopie visuelle.

Les plaintes visuelles ont été quantifiées à l'aide d'un indice (cf. §3.6.2.1) deux fois par jour : le matin lorsque le sujet arrivait et le soir lorsqu'il partait. L'idée était de montrer que la variation de ces plaintes pouvait être liée aux conditions photométriques.

La relation mise en évidence est la suivante:

$$\Delta IP \approx \mu_0 IP_m + \mu_1 D + \mu_3 \quad (\text{eq 4.7})$$

où

ΔIP est la variation d'indice de plainte entre le soir et le matin, IP_m l'indice de plainte correspondant au matin en arrivant et D la dose correspondant aux conditions photométriques.

Nous avons constaté que cette dose correspond au temps (en secondes) pendant lequel l'éclairage mesuré sur la potence était compris entre les deux valeurs E_{\min} et E_{\max} . Cette définition est paradoxale car on pourrait penser que l'effet de dose est plutôt lié au temps pendant lequel l'éclairage est en dehors de fourchettes. En fait, le coefficient μ_1 devant D est négatif.

La figure 4.50 montre que la corrélation du modèle avec les indices de plaintes calculés pour le sujet n°1 (chercheur) vaut 0.916 et est significative. Pour le sujet n°2 (figure 4.51) la corrélation est encore un peu meilleure (0.947) et aussi significative. Le tableau 4.3 présente les estimations des trois paramètres de l'équation 4.7 pour les deux sujets.

	Sujet 1		Sujet 2	
	Estimations	t(loï normale)	Estimations	t(loï normale)
E_{\min}	180		61	
E_{\max}	382		567	
μ_0	-0.827 ± 0.158	5.2	-1.267 ± 0.265	4.8
μ_1	-0.0002 ± 0.0001	2.7	-0.0012 ± 0.0002	5.8
μ_2	1.836 ± 0.571	3.2	42.0 ± 5.3	7.9

Tableau 4.3. Evaluation des trois paramètres de l'équation 4.7 pour les sujets ainsi que des fourchettes des éclairages (les variances n'ont pas pu être estimées pour ces derniers paramètres).

Ce tableau montre que si les valeurs des paramètres sont significatives, elles diffèrent grandement entre les deux individus. Le sujet n°2 semble avoir une fatigue plus élevée en fin de journée que le sujet n°1.

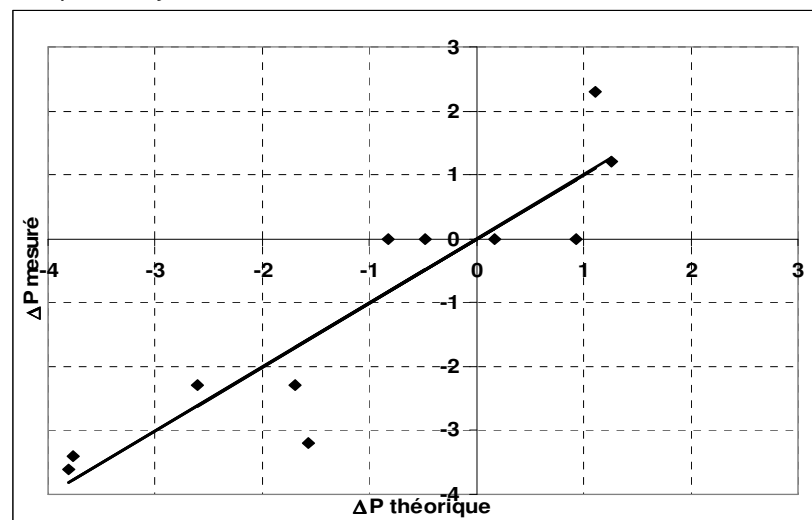


Figure 4.50. Estimation de la prédiction par l'équation 4.7. de la variation journalière de l'indice plainte en fonction de l'effet de la variation des conditions lumineuses. Cas du sujet No 1: la relation entre points observés et valeur calculée est significative (corrélacion de 0.916).

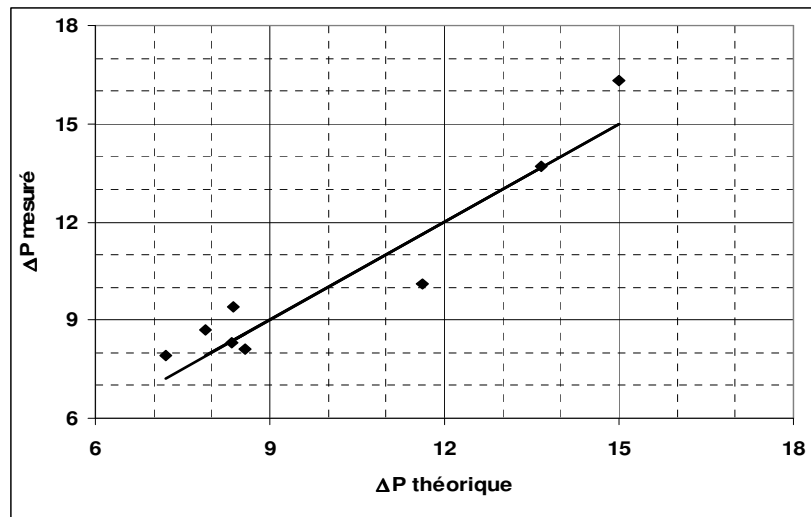


Figure 4.51. Estimation de la prédiction par l'équation 4.7. de la variation journalière de l'indice plainte en fonction de l'effet de la variation des conditions lumineuses. Cas du sujet No 2. La relation entre points observés et valeurs calculées est significative (corrélation de 0.947).

En conclusion, ces résultats montrent que dans le cas d'une sollicitation importante en relation avec la nature de la tâche, ce qui devait être le cas pour le sujet no 2, nous avons bien trouvé une relation entre les variations de lumière et l'expression des plaintes. Cependant, le protocole adopté ne nous a pas permis de distinguer parmi les plaintes, un lien direct avec le sentiment de gêne à la lumière. Ce type d'investigation mérite donc d'être poursuivi.

4.4 Expérience en laboratoire

4.4.1 Préambule

L'expérience en local prototype a permis de trouver un lien entre le sentiment de luminosité de la tâche (l'écran ou le document imprimé) et deux autres paramètres, à savoir, d'une part, le contraste entre cette tâche avec l'entourage et, d'autre part, les performances du sujet à un test rendant compte de sa sensibilité à la lumière. Le dispositif expérimental de l'étude en laboratoire a permis de soumettre les sujets à des situations lumineuses contrôlées et variées. Les conditions lumineuses choisies (cf. § 3.2.2.2.) ont été nettement plus variées que celles qui régnaient au cours de l'expérience en local prototype. En effet, l'éclairage horizontal a varié dans un rapport de 54 (de 81 à 4370 lx) contre 4.2 (de 245 à 1040 lx) dans le local prototype; de même, l'éclairage vertical reçu par les yeux a varié dans un rapport de 107 (de 35 à 3745 lx) contre 5.3 (de 35 à 3745 lx) dans le local prototype. De plus, le jeu de trois panneaux lumineux permettait de soumettre les sujets à des distributions de lumière très variées.

4.4.2. Etude du sentiment de luminosité

Comme pour l'expérience dans le local prototype, les deux questions relatives au sentiment de luminosité étaient les suivantes:

*Trouvez-vous que la luminosité de l'écran est:
très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) – très élevée(7) ?*

Trouvez-vous que la luminosité du document imprimé est:
 très faible(1) – faible (2) – un peu faible(3) – bonne(4) – un peu élevée(5) – élevée(6) –
 très élevée(7) ?

Ces deux questions ont été posées uniquement au cours des séances 1 à 4 et de la séance 9. Dans les séances 1 à 4, les sujets devaient se prononcer sur la luminosité de leur écran, pour 5 réglages de luminance (5, 15, 30, 60 et 120 cd/m²), et aussi sur la luminosité du document imprimé (posé sur la table). Chaque sujet devait donc répondre 6 fois à cette question pour chacune des 16 situations, ce qui correspond à 16 x 6 = 96 réponses par sujet. 25 sujets ayant participé à ces séances, le total de réponses était de 96 x 25 = 2400. Finalement, pour des raisons techniques, seules 1818 réponses ont pu être utilisées, ce qui représentait néanmoins un nombre suffisant de données pour étudier le phénomène.

Dans cette expérience, il fallait une dynamique suffisante, c'est-à-dire, représentative des variations observées sur le terrain pour la luminance de la tâche. On voit sur le graphique 4.51 que si les luminances ont varié d'une valeur de 5 cd/m² jusqu'à 1230 cd/m² (soit un rapport d'environ 250, leur distribution est irrégulière, avec une faible représentation des valeurs supérieures à 200 cd/m². Par contre, la distribution des contrastes "entourage-tâche" présentée à la figure 4.53 montre une répartition normale, centrée sur une valeur de 4, avec des valeurs situées entre 0.09 et 272.

En effet, par rapport au modèle de confort, le contraste "entourage-tâche" est plus intéressant à étudier que la luminance de la tâche elle-même.

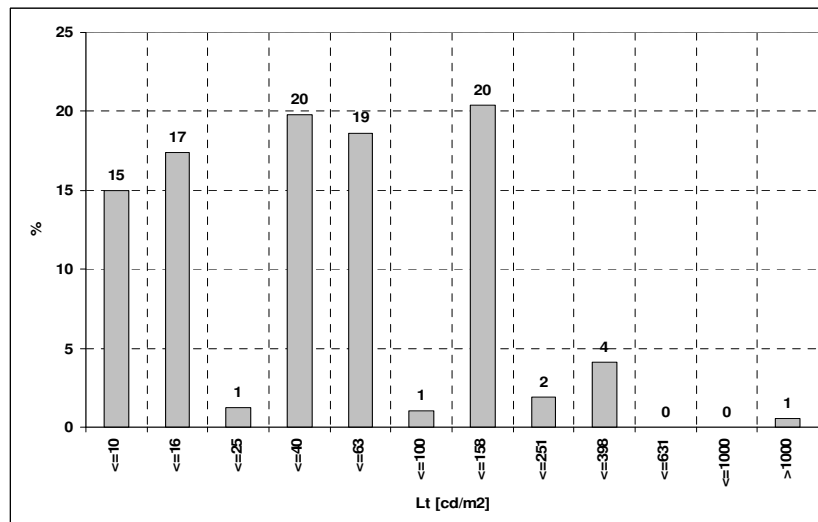


Figure 4.52. Distribution des luminances de la tâche (écran et document mélangés) soumises aux sujets.

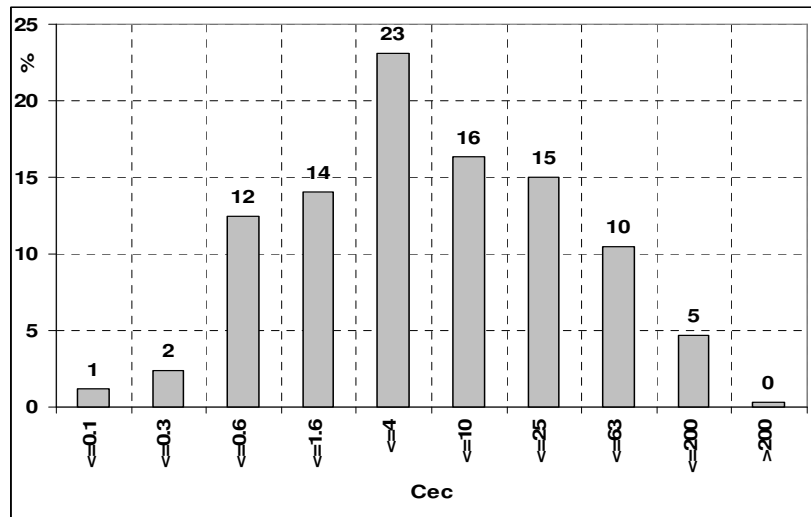


Figure 4.53. Distribution du contraste tâche – entourage (Cec), définie comme le rapport entre la luminance moyenne du champ visuel et la luminance de la tâche (indifféremment écran ou document imprimé).

Lors de l'expérience dans le local prototype, c'est le contraste entre la tâche et le document imprimé qui a déterminé essentiellement le sentiment de luminosité, contrairement à la luminance de la tâche elle-même dont la luminance avait peu varié. Prenant en compte la loi de Weber-Fechner (réf. [87]) qui relie le sentiment de luminosité au logarithme de la luminance, nous avons comparé les corrélations entre le sentiment de luminosité et respectivement les luminances et les contrastes obtenus, soit d'après leurs valeurs logarithmiques, soit d'après leurs valeurs absolues.

Nous avons analysé le sentiment de luminosité (SL) de la tâche, en considérant l'écran seul, puis le document imprimé seul, et enfin l'écran et le document pris ensemble.

4.4.2.1. Ecran

La validation avec l'écran considéré pour lui-même représentait 1547 réponses sur les 1818.

	LT	Cec	SL
LT	1	-0.389	0.823
Cec	-0.389	1	-0.474
SL	0.823	-0.474	1

Tableau 4.4. Tableau des corrélations entre la luminance de la tâche LT, (ici l'écran), le contraste entre l'écran et l'entourage Cec et le sentiment de luminosité de l'écran SL.

	Ln(LT)	Ln(Cec)	SL
Ln(LT)	1	-0.613	0.836
Ln(Cec)	-0.613	1	-0.659
SL	0.836	-0.659	1

Tableau 4.5 Tableau des corrélations entre les logarithmes des luminances et des contrastes.

Les deux tableaux ci-dessus montrent des corrélations importantes entre le sentiment de luminosité procuré par l'écran et, d'une part, sa luminance et, d'autre part, son contraste avec l'environnement.

On voit aussi qu'en prenant le logarithme, on améliore les corrélations qui passent pour les trois variables de 0.839 à 0.856, l'amélioration la plus nette concernant le contraste (de -0.474 à -0.659).

Etant donné ces fortes corrélations, nous avons formulé un modèle additif liant le sentiment de luminosité aux deux autres variables :

$$SL = \alpha_T \text{Ln}(L_T) + \alpha_{EC} \text{Ln}(C_{EC}) + \alpha_R \quad (\text{eq 4.8})$$

Pour l'écran l'estimation des paramètres et de leur variance donne les valeurs suivantes :

$$\begin{cases} \alpha_T \approx 0.935 \pm 0.022 \\ \alpha_{EC} \approx -0.208 \pm 0.015 \\ \alpha_R \approx 0.051 \pm 0.094 \end{cases}$$

L'interprétation de ces coefficients montre que les deux variables L_T et C_{EC} influencent significativement (les coefficients sont non nuls) le sentiment de luminosité et que le contraste a un effet inverse à celui attribué à la luminance de l'écran, ce qui est cohérent en regard des résultats de l'expérience du local prototype (voir tableau croisé de la figure 4.24).

4.4.2.2. Document imprimé

Le document imprimé considéré séparément, représentait 271 réponses sur les 1818.

	LT	Cec	SL
LT	1	0.021	0.400
Cec	0.021	1	-0.074
SL	0.400	-0.074	1

Tableau 4.6. Tableau des corrélations entre la luminance de la tâche LT (ici le document imprimé), le contraste entre la tâche et l'entourage et le sentiment de luminosité de l'entourage.

	Ln(LT)	Ln(Cec)	SL
Ln(LT)	1	0.178	0.464
Ln(Cec)	0.178	1	-0.052
SL	0.464	-0.052	1

Tableau 4.7. Tableau des corrélations entre le sentiment de luminosité et les § logarithmes des luminances et des contrastes.

Si on reprend le modèle représenté par l'équation 4.8, l'évaluation des coefficients de ce modèle pour le cas du document imprimé donne les valeurs suivantes :

$$\begin{cases} \alpha_T \approx 0.447 \pm 0.050 \\ \alpha_{EC} \approx -0.280 \pm 0.109 \\ \alpha_R \approx 1.622 \pm 0.241 \end{cases}$$

Le degré de signification est moindre. Cela se comprend puisque le contraste a varié beaucoup moins pour le document imprimé qui, lui-même, réfléchissait la lumière.

Comparé au cas de l'écran, l'interprétation des coefficients est la suivante:

- Le coefficient α_T , représentant l'influence de la luminance, est significativement plus grand (0.935) pour l'écran que pour le document imprimé (0.447). Cela signifie que pour une même luminance, l'écran semble plus lumineux que le document imprimé. On peut trouver deux causes à cette différence: soit la vibration de l'écran (70hz) qui comporte une

stimulation spécifique des mécanismes visuels, soit la différence de dimensions entre les deux tâches, l'écran étant, angulairement, plus grand que le document.

- Le coefficient α_{EC} , représentant l'influence du contraste, est comparable à celui de l'écran à la différence près que la variance est plus importante.
- Le troisième coefficient, α_R , symbolisant des influences résiduelles, est lui très différent. Cela signifie que d'autres paramètres influençaient le sentiment de luminosité SL.

4.4.2.3. Tâche : écran + document imprimé

Etant donné les fortes corrélations mises en évidence pour l'écran et le document imprimé pris séparément, il va de soi que ces corrélations devaient rester importantes dans le cas où les deux types de tâche sont considérées ensemble. Pour le modèle proposé (eq 4.8), on trouve dans ce cas une corrélation totale de 0.817. Quant aux coefficients du modèle, ils prennent les valeurs suivantes :

$$\begin{cases} \alpha_T \approx 0.752 \pm 0.021 \\ \alpha_{EC} \approx -0.238 \pm 0.015 \\ \alpha_R \approx 0.635 \pm 0.090 \end{cases}$$

Nous avons illustré ce cas général par la prédiction que donne le modèle correspondant.

Le graphique 4.53 montre l'étendue du nuage de points. Cela signifie qu'une valeur de SL calculée par le modèle ne permet pas de prévoir précisément ce que les sujets vont réellement ressentir. Par contre, il est possible de déterminer la probabilité que ces sujets vont ressentir un manque, un excès ou une suffisance de lumière. La méthode pour estimer et modéliser ces probabilités a été exposée au paragraphe 3.7.3.

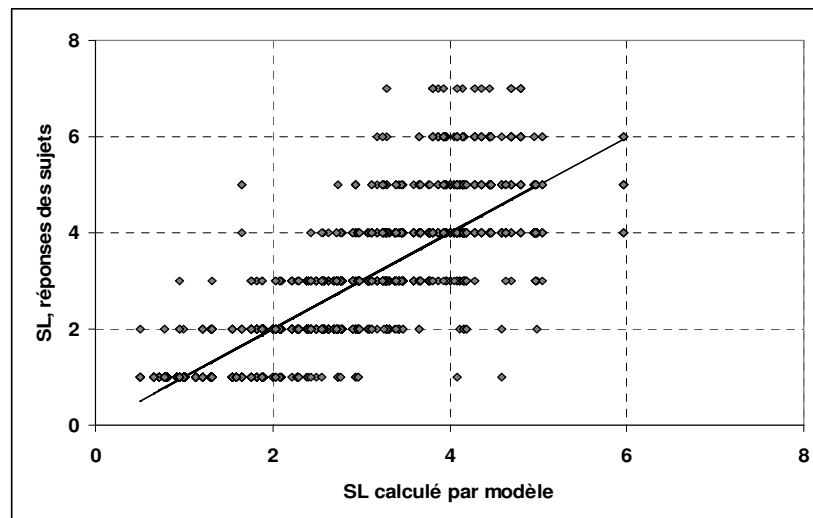


Figure 4.54. Comparaison entre les réponses des sujets (ordonnées) et les réponses calculées par le modèle (abscisses). La corrélation est de 0.817.

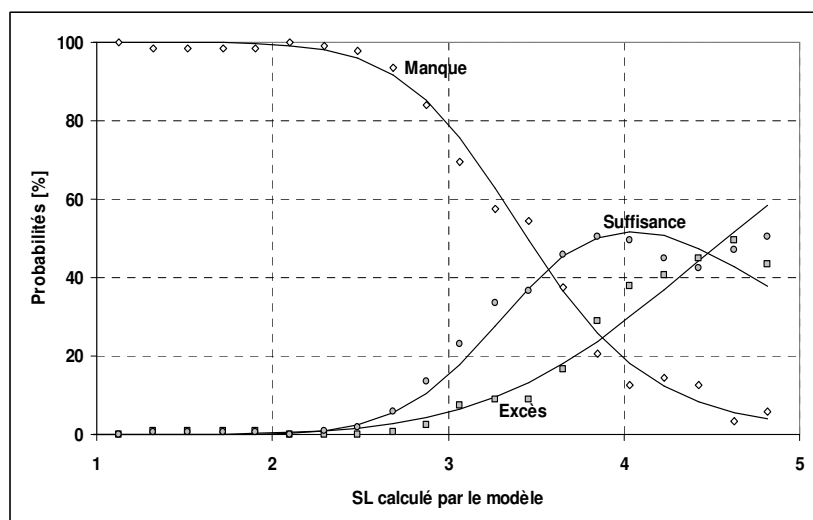


Figure 4.55. Probabilités de ressentir la luminosité insuffisante, appropriée ou excessive au niveau de la tâche en fonction de l'indice SL calculé à partir du modèle. Les courbes correspondent aux modèles permettant d'estimer ces diverses probabilités. Les corrélations entre probabilités modélisées (courbes) et mesurées (symboles) sont très fortes (manque : 0.997, excès : 0.974 et adéquation : 0.984).

Les modèles de probabilités sont décrits ci-dessous (pour la formule mathématique voir § 3.7.3) :

Manque de lumière :

$$PM(SL) = 100 \frac{3.45^{9.61}}{3.45^{9.61} + SL^{9.61}} \quad (\text{eq 4.9})$$

Excès de lumière :

$$PE(SL) = 100 \frac{SL^{6.69}}{4.58^{6.69} + SL^{6.69}} \quad (\text{eq 4.10})$$

Adéquation :

$$PS(SL) = 100 - 100 \frac{3.45^{9.61}}{3.45^{9.61} + SL^{9.61}} - 100 \frac{SL^{6.69}}{4.58^{6.69} + SL^{6.69}} \quad (\text{eq 4.11})$$

En introduisant les valeurs numériques dans le modèle, l'équation devient :

$$\boxed{SL(L_T, C_{EC}) = 0.752 \ln(L_T) - 0.238 \ln(C_{EC}) + 0.635} \quad (\text{eq 4.12})$$

Ces équations signifient qu'en mesurant la luminance de la tâche et en établissant son contraste avec l'entourage (par l'intermédiaire de la mesure d'un simple éclairage au niveau des yeux – qui prend donc l'ensemble du champ visuel), il est possible de prédire en terme de probabilité, comment sera ressentie la luminosité pour un champ visuel donné.

4.4.2.4. Amélioration de la prédiction du sentiment de luminosité

Si le calcul présenté au paragraphe précédant constitue une bonne approximation du phénomène de perception de la luminosité, il s'avère que les deux seuls paramètres photométriques pris en considération n'expliquent pas tout. En effet, l'expérience du local prototype avait montré que le sentiment de luminosité était, comme attendu, non seulement influencé par les caractéristiques photométriques du champ visuel, mais également par la propre sensibilité du sujet à la lumière estimée au travers de la valeur L_m du test C45. Rappelons que c'était l'hypothèse attendue a priori en considérant la variabilité biologique illustrée par le test de référence.

En fait, dans cette étude en laboratoire, on met en évidence également des corrélations significatives avec le logarithme de quatre autres paramètres :

- la luminance physiologique L_m (corrélation de 0.1042) ;
- la température de couleur de la tâche T_t (corrélation de -0.2098) ;
- le contraste caractère – tâche C_c , (corrélation de 0.6913) ;
- l'indice d'hétérogénéité I (corrélation de -0.052).

Ces corrélations, qui sont significative même si certaines d'entre elles sont très faibles, confirment non seulement l'influence du profil visuel mais aussi celle de nouvelles variables photométriques.

Afin de tenir compte de l'ensemble de ces variables, nous avons introduit un nouveau modèle additif, constituant en quelque sorte une généralisation de la loi Weber- Fechner (cf. §2.2.4.2) pour la lumière:

$$SL = \alpha_T \ln(L_T) + \alpha_{EC} \ln\left(\frac{E_Y I}{(1-I)L_T}\right) + \alpha_C \ln(C_c) + \alpha_L \ln(L_m) + \alpha_{TC} \ln(T_t) + \alpha_R \quad (\text{eq 4.13})$$

A noter que le contraste tâche – entourage a été remplacé dans cette formule par $\frac{E_Y I}{(1-I)L_T}$. En fait cela revenait à remplacer la luminance moyenne (qui vaut $\frac{E_Y}{\pi}$) par une nouvelle luminance que l'on appellera luminance d'entourage (L_E) définie comme suit:

$$L_E = \frac{E_Y I}{1-I} \quad (\text{eq 4.14})$$

En utilisant la méthode d'ajustement linéaire et en estimant les coefficients de ce modèle et leur variance, la corrélation était de 0.843:

	Ecran seul		Document imprimé	
	Estimations	T (loi normale)	Estimations	t
α_T	0.990 ± 0.028	35.4	0.454 ± 0.050	9.1
α_{EC}	-0.107 ± 0.011	9.1	-0.107 ± 0.011	9.1
α_C	1.274 ± 0.068	18.7	1.274 ± 0.068	18.7
α_L	0.213 ± 0.024	8.9	0.213 ± 0.024	8.9
α_{TC}	-2.045 ± 0.273	7.5	-2.045 ± 0.273	7.5
α_R	16.949 ± 2.329	7.3	16.949 ± 2.329	7.3

Tableau 4.8. Tableau présentant les estimations des coefficients du modèle avec le test t de signification, en séparant l'écran et le document imprimé.

Ce tableau montre que les coefficients ainsi estimés étaient bien significatifs ($t > 1.96$), ce qui donne la preuve que toutes les variables photométriques, auxquels ces coefficients étaient associés, influençaient réellement la sensation de luminosité des sujets. Cependant, comme le montre la figure 4.56, le nuage de points obtenu diffère peu du nuage de points que l'on avait obtenu avec les seules variables, L_T et C_{EC} (voir figure 4.53), et la différence entre les deux corrélations des deux modèles était faible (0.843 comparé à 0.817).

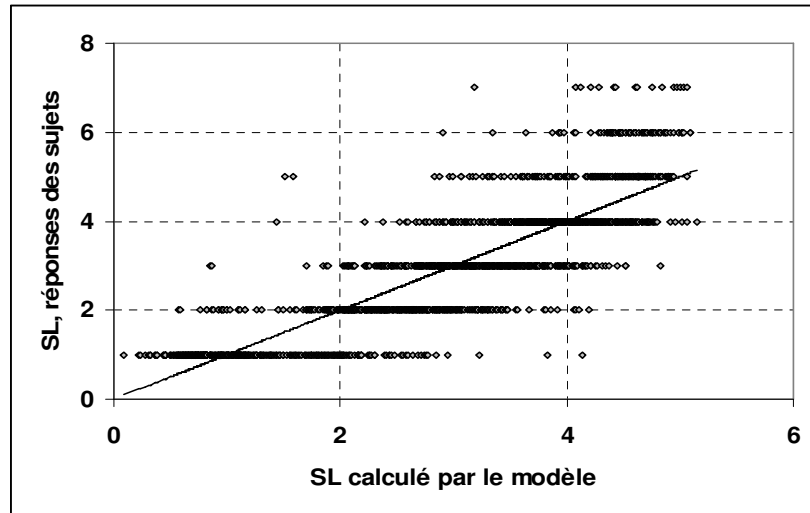


Figure 4.56. Comparaison entre les réponses réelles des sujets (ordonnées) avec les réponses calculées par le modèle (abscisses). La corrélation était de 0.843.

De ce nuage de points, nous en avons déduit, comme dans le paragraphe précédent, les probabilités d'un niveau de lumière insuffisant, adéquat ou en excès.

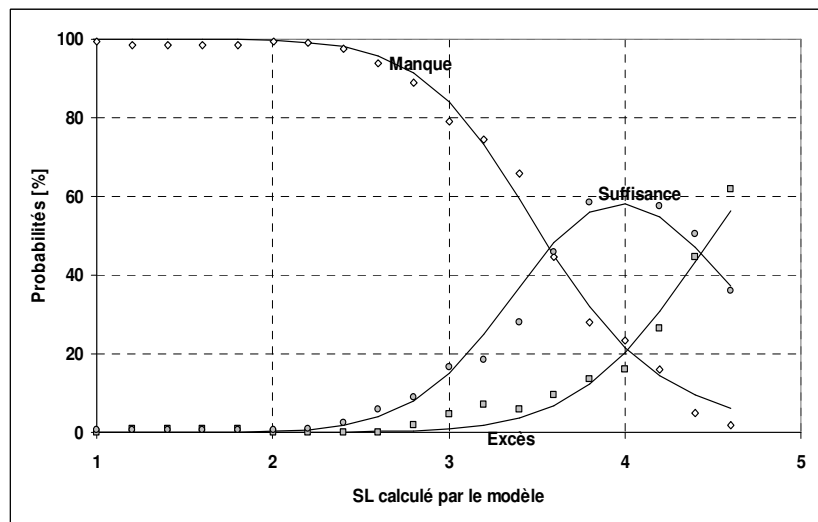


Figure 4.57. Probabilités de ressentir le niveau de lumière insuffisant, adéquat ou excessif au niveau de la tâche en fonction de l'indice SL calculé à partir du modèle. Les courbes correspondent aux modèles permettant d'estimer ces diverses probabilités. Les corrélations entre probabilités modélisées (courbes) et valeurs mesurées (symboles) sont très fortes (manque : 0.997, excès : 0.989 et adéquation : 0.992).

Les modèles associés aux trois probabilités sont les suivants :

Manque de lumière :

$$PM(SL) = 100 \frac{3.53^{10.26}}{3.53^{10.26} + SL^{10.26}} \quad (\text{eq 4.15})$$

Excès de lumière :

$$PE(SL) = 100 \frac{SL^{11.68}}{4.5^{11.68} + SL^{11.68}} \quad (\text{eq 4.16})$$

Adéquation :

$$PS(SL) = 100 - 100 \frac{3.53^{10.26}}{3.53^{10.26} + SL^{10.26}} - 100 \frac{SL^{11.68}}{4.5^{11.68} + SL^{11.68}} \quad (\text{eq 4.17})$$

En introduisant les valeurs numériques du tableau 4.8 des coefficients dans l'équation 4.13 du modèle, on obtient les équations suivantes :

$$SL = \begin{cases} 0.990 \ln(L_T) - 0.107 \ln\left(\frac{E_V I}{(1-I)L_T}\right) + 1.274 \ln(C_c) + 0.213 \ln(L_m) - 2.045 \ln(T_t) + 16.949, \text{ pour l'écran} \\ 0.454 \ln(L_T) - 0.107 \ln\left(\frac{E_V I}{(1-I)L_T}\right) + 1.274 \ln(C_c) + 0.213 \ln(L_m) - 2.045 \ln(T_t) + 16.949, \text{ pour le doc.} \end{cases}$$

(eq 4.18)

4.4.2.5. Application du modèle aux situations de l'expérience

Le modèle a été appliqué aux 16 situations de l'expérience pour le cas de l'écran réglé aux deux valeurs de luminance les plus élevées (60 et 120 cd/m²) susceptibles de mettre en évidence les plus grandes différences entre situations. On a comparé, par le test χ^2 les pourcentages réels des réponses des sujets (niveau de lumière insuffisant, adéquat ou excessif) avec les pourcentages théoriques calculés par le modèle. Le graphique 4.55 montre le résultat, en terme de degré de signification, de ces tests pour chaque situation (si $p \leq 5\%$, le modèle ne prédit pas correctement le pourcentage réel).

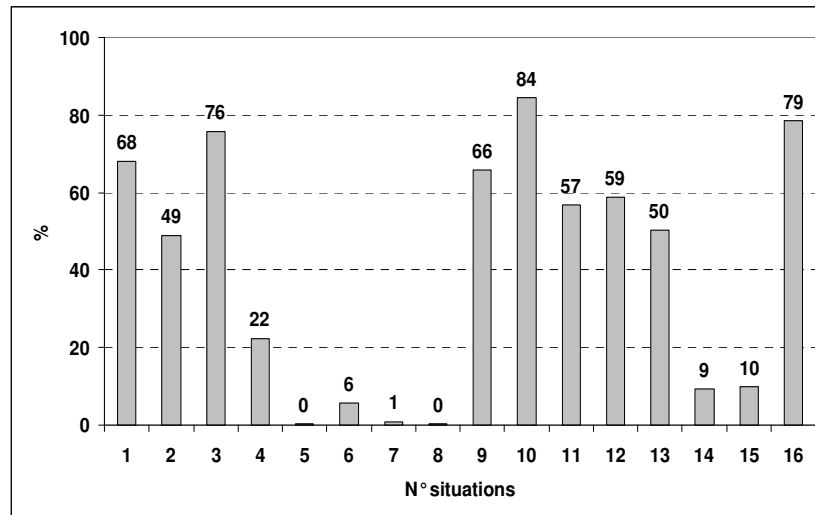


Figure 4.58. Comparaison en terme de degré p de signification des distributions réelles et théoriques des réponses établies pour toutes les situations.

On remarque que seulement pour les situations 5, 7 et 8 les degrés de signification sont inférieurs à 5%, ce qui signifierait que le modèle n'a pas bien expliqué le phénomène dans ces trois cas-là.

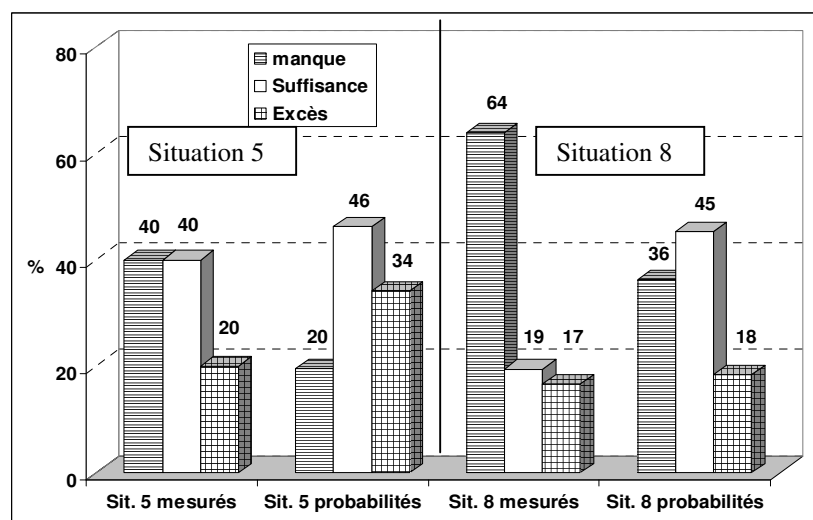


Figure 4.59. Comparaison des pourcentages de réponses des sujets avec les probabilités théoriques, pour les deux situations n°5 et n°8. où la différence était significative.

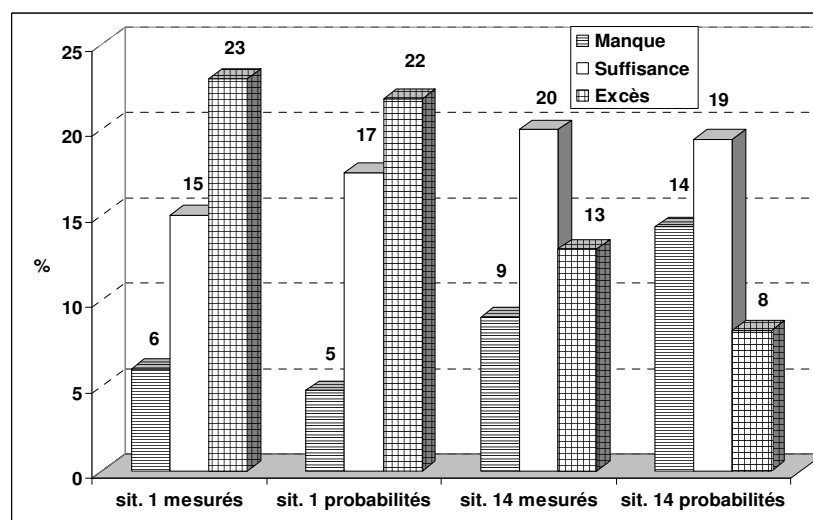


Figure 4.60. Comparaison des pourcentages de réponses des sujets avec les probabilités, pour les deux situations : n°1 (la situation la plus sombre) et la n°14 (la situation la plus inhomogène). Pour ces deux situations, la différence était non significative.

Pour les situations 1 et 14 (figure 4.60), on voit que les pourcentages de réponses et les probabilités théoriques sont effectivement très proches, ce qui témoigne du fait que le degré de signification, d'après le graphique 4.57, pour ces deux situations est respectivement 68% et 9% (>> 5%).

En ce qui concerne les situations 5 et 8 (figure 4.59), les probabilités théoriques sont assez éloignées des pourcentages de réponses. Il semblerait que dans les deux cas le modèle sous-estime le manque de lumière (pour la situation 5 la probabilité est de 20% contre un pourcentage de réponse de 40%, de même pour la situation 8 on passe de 36% à 64%).

4.4.2.4 Application du modèle par rapport aux sujets

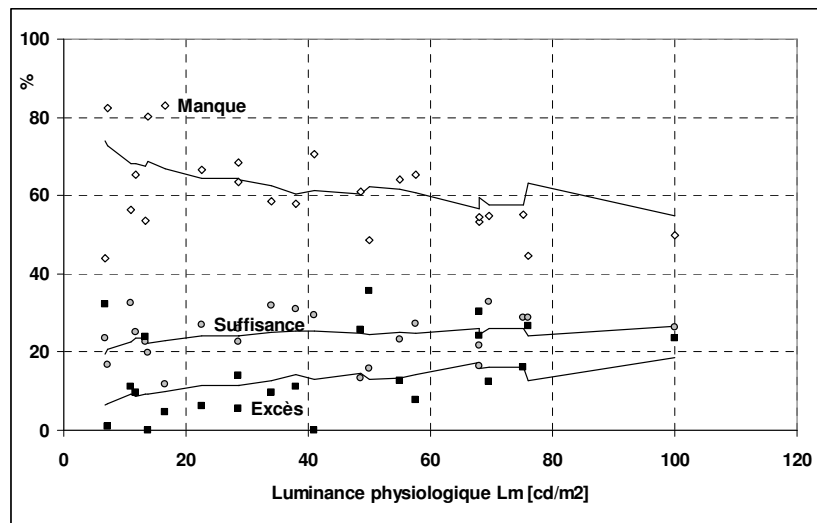
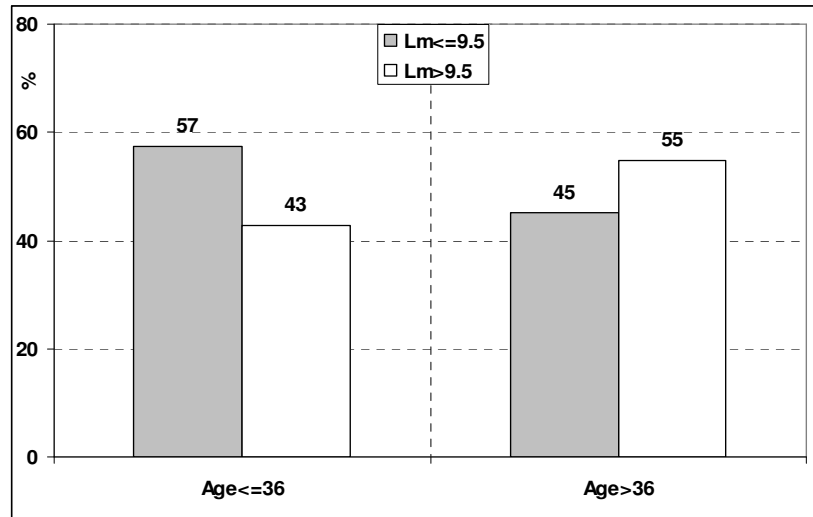


Figure 4.61. Comparaison des pourcentages des réponses des sujets et probabilités théoriques (courbes) en fonction de leur "luminance physiologiques" (Lm).

Ce graphique montre que la luminance physiologique a bien eu un effet sur la réponse des gens : le sentiment d'un excès augmente avec la valeur de la "luminance physiologique". Plus cette luminance augmentait, plus les sujets ressentaient un excès de lumière. En effet les corrélations entre Lm et ces pourcentages étaient de -0.495 pour le "manque", 0.407 pour "l'excès" et 0.174 pour la "suffisance" de lumière. Seule la corrélation concernant le pourcentage de "suffisance" dans les réponses n'était pas significative, ce qui se traduisait par une invariance par rapport à Lm.

Tout se passe en fait comme si les sujets ayant une valeur élevée de Lm, avaient plus de mal à distinguer le manque, l'excès et la suffisance de lumière par rapport à ceux ayant une valeur de Lm faible. En effet on voit sur le graphique 4.58 que les courbes se rapprochent quand Lm augmente.

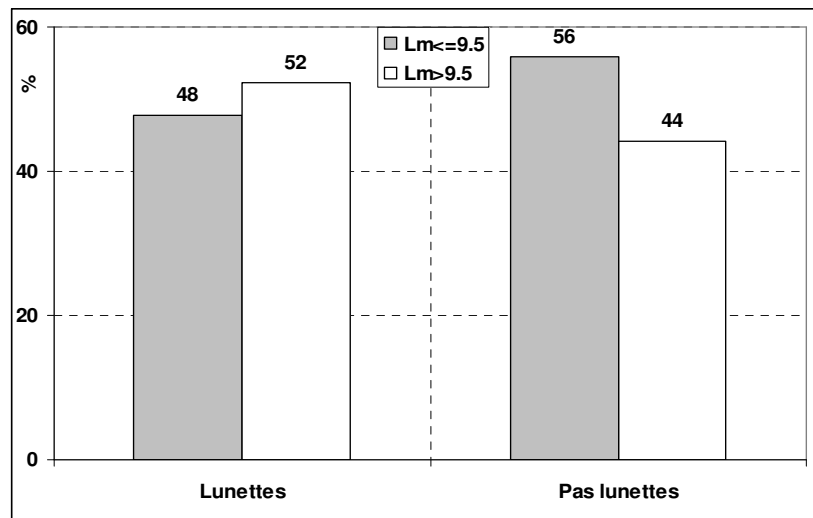
Ce comportement pourrait correspondre à un effet de l'âge ou de la présence de défauts dioptriques. L'effet de l'âge, qui se caractérise notamment par un rétrécissement pupillaire, se traduit par une valeur de luminance physiologique Lm plutôt élevée associée souvent à une perte d'acuité. Cette même tendance s'observe chez les porteurs de correction (Cf. réf. [72]).



	Age ≤ 36 ans	Age > 36 ans	Totaux
Lm ≤ 9.5 cd/m ²	302	311	613
Lm > 9.5 cd/m ²	225	376	601
Totaux	527	687	1214

$\chi^2 = 17.3$, df=1, p<<1%

Figure 4.62. Relation entre l'âge et la luminance physiologique dans le groupe témoin de 1214 individus du terrain



	Lunettes	Pas de lunettes	Totaux
Lm ≤ 9.5 cd/m ²	386	227	613
Lm > 9.5 cd/m ²	421	180	601
Totaux	807	407	1214

$\chi^2 = 6.8$, df=1, p<<1%

Figure 4.63. Relation entre le port de lunettes et la luminance physiologique dans le groupe témoin de 1214 individus du terrain.

Ces deux tableaux croisés vérifient que, plus les sujets sont jeunes et sans défaut visuel, plus leur luminance physiologique est faible et réciproquement.

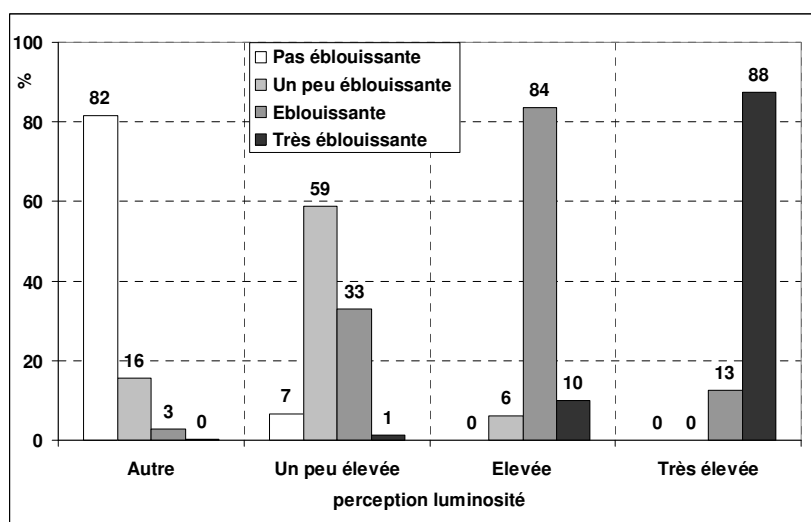
4.4.3. Eblouissement

Dans l'expérience du local prototype, la question relative à un jugement global sur l'éblouissement avait posé quelques difficultés aux sujets, nous en avons tenu compte dans l'expérience de laboratoire. D'une part, nous avons séparé l'éblouissement dû à la tâche de l'éblouissement dû à l'environnement et, d'autre part, nous avons demandé aux sujets d'évaluer l'effet d'éblouissement pour chaque source de lumière considérée séparément.

4.4.3.1. Eblouissement lié à la tâche

Les sujets ne devaient pas seulement se prononcer sur la perception de luminosité de la tâche, mais également sur l'éblouissement qu'elle était susceptible d'engendrer: *Trouvez-vous que la tâche (l'écran ou le document imprimé) est: pas éblouissant(1) – un peu éblouissant(2) – éblouissant(3) – très éblouissant(4) ?*

Cette question est comparable à celle de la perception de la luminosité. En effet, l'éblouissement provoqué par une quelconque zone du champ visuel (dont la tâche en particulier) correspond à un excès de luminosité de celle-ci. Le tableau croisé ci-dessous (figure 4.64) montre qu'il y avait un lien réel entre les deux questions et que les réponses « élevé » et « très élevé » étaient confondues avec celles correspondant respectivement à « éblouissant » et « très éblouissant ». En effet, la corrélation entre les deux variables est très significative (0.46).



	Autre	Un peu élevée	Elevée	Très élevée	Totaux
Pas éblouissante	1270	10	0	0	1280
Un peu éblouissante	242	89	5	0	336
Eblouissante	43	50	67	2	162
Très éblouissante	3	2	8	14	27
Totaux	1558	151	80	16	1805

$\chi^2 = 1841, df=9, p < < 1\%$

Figure 4.64 Tableau croisant les réponses à la luminance avec celles relatives à l'éblouissement.

Le test vérifie la correspondance, très grande, entre les questions de perception de luminosité et d'éblouissement provenant de la tâche. La catégorie « autre » réunit les réponses " manque de lumière " et "lumière en suffisance".

On peut déduire de ces résultats que si le sujet avait répondu « luminosité élevée », il y avait alors 84% de chances qu'il réponde « éblouissant ».

Cette correspondance entre les deux questions permet de modéliser directement l'éblouissement dû à la tâche. On peut appliquer le même modèle de perception de la luminosité qui généralise la loi de Weber-Fechner (équation 4.13); seul le critère dans le calcul des probabilités change. Dans le paragraphe précédent, le critère était excès de lumière correspondant aux réponses « un peu élevée », « élevée » et « très élevée » de la question de perception. Dans ce cas-ci, le critère d'éblouissement est remplacé par les réponses « élevée » et « très élevée », comme le permet le tableau croisé.

Remarque: la taille angulaire de la tâche n'a pas été étudiée dans ce travail, mais on peut penser qu'elle a une influence sur le facteur \square_T de l'équation 4.13.

Comme pour le cas de la perception de la luminosité, on en a déduit, avec ce nouveau critère, la probabilité d'éblouissement dû à la tâche (notons le PET). Nous avons pu ainsi estimer cette probabilité, par les mêmes méthodes que décrites dans le paragraphe précédent :

$$\text{PET}(\text{SL}) = 100 \frac{\text{SL}^{14.56}}{4.88^{14.56} + \text{SL}^{14.56}} \quad (\text{eq 4.19})$$

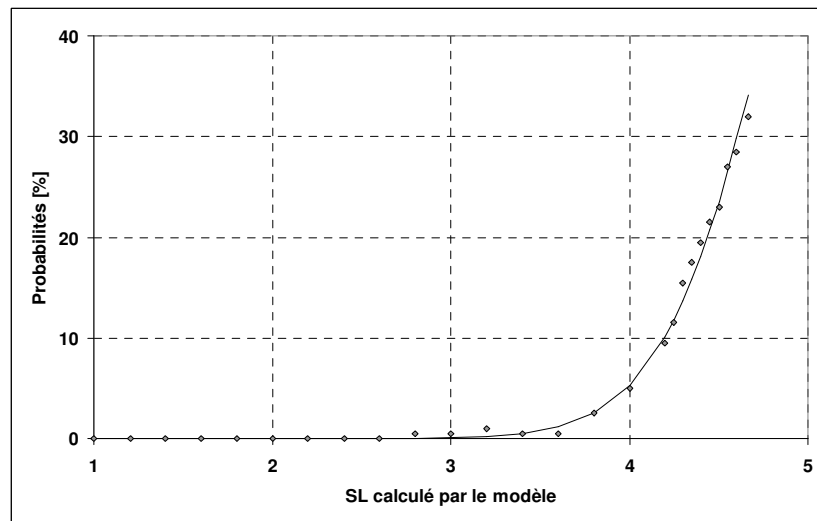


Figure 4.65. Probabilités de ressentir la tâche comme éblouissante, en fonction de l'indice SL de sentiment de luminosité décrit par le modèle. En trait plein, les valeurs du modèle de probabilité dont la corrélation avec les points mesurés est de 0.997.

On observe sur ce graphique que la probabilité ne dépasse pas 35 %, cela vient du fait que la tâche a rarement eu une luminance extrêmement élevée, à l'exception du document imprimé dont la luminance pouvait atteindre la valeur de 1230 cd/m². Mais ces cas ne représentaient statistiquement qu'une trop faible part de l'ensemble des données (seulement dans 9% des cas la luminance du document imprimé était supérieure à 120 cd/m², soit la valeur la plus élevée pour l'écran).

4.4.3.2. Eblouissement lié à l'environnement (séance 10)

Pour les autres séances, les sujets devaient s'exprimer globalement sur l'éblouissement de l'environnement, alors que, au cours de cette 10^{ème} séance, ils devaient s'exprimer sur leur sensation d'éblouissement provenant de chaque source de lumière prise séparément. Pour bien faire la distinction, entre ces deux types de critères, Il nous fallait tout d'abord définir un critère d'éblouissement global (supposé être ressenti par le sujet à partir de leur éblouissement dû à l'ensemble des sources). Puis, dans un deuxième temps, il s'agissait de mettre en évidence les relations existantes entre cet éblouissement global et les divers paramètres photométriques mesurés, en passant notamment par l'indice officiel d'éblouissement, à savoir l'indice UGR.

Pour chaque source de lumière la question suivante a été posée:

La lumière de la source, vous paraît-elle:

pas gênante(1) – un peu gênante(2) – gênante(3) - éblouissante(4) -très éblouissante(5) ?

les variables correspondant aux réponses des 4 questions ont été notées comme suit:

- SEL : **S**entiment d'**E**blouissement provenant des **L**ampes suspendues ;
- SEG : **S**entiment d'**E**blouissement provenant du panneau lumineux à **G**auch ;
- SEM : **S**entiment d'**E**blouissement provenant du panneau lumineux au **M**ilieu ;
- SED : **S**entiment d'**E**blouissement provenant du panneau lumineux à **D**roite.

En ce qui concerne la distribution de lumière prise globalement, la question suivante a été posée:

Globalement, quand vous lisez l'écran, la distribution de lumière vous paraît-elle:

pas gênante(1) – un peu gênante(2) – gênante(3) - éblouissante(4) -très éblouissante(5)?

Nous avons désigné par SE la variable correspondant à la réponse à cette question.

L'étude de cette relation entre les réponses à la question globale et les réponses aux 4 questions spécifiques a mis en évidence une corrélation multiple très forte (0.796). On en déduit la relation suivante entre les cinq variables:

$$SE \approx 0.0995 SEL + 0.0883 SEG + 0.6553 SEM + 0.0558 SED \quad (\text{eq 4.20})$$

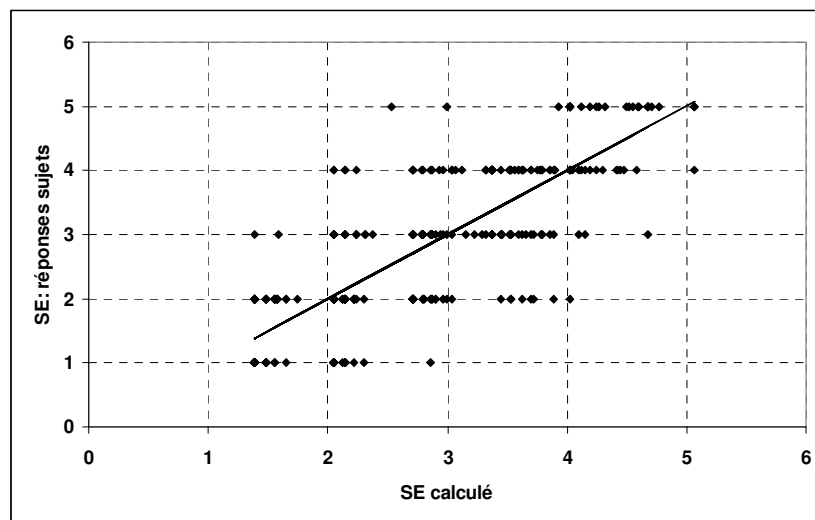


Figure 4.66. Réponses des sujets à la question concernant la gêne due à la distribution globale de lumière, comparées aux valeurs calculées à partir des réponses aux quatre questions spécifiques. Ce nuage de points présentait une corrélation de 0.796.

On remarque dans la formule présentée ci-dessous (équation 4.21), que les coefficients devant SEG, SEM et SED (les trois panneaux) sont assez cohérents avec l'espace visuel

pris par ces panneaux. En effet, les panneaux de droite et de gauche occupaient approximativement la même place dans le champ visuel, tandis que le panneau du milieu occupait une place beaucoup plus grande (étant en plus dans l'axe de vision). On retrouve cette différence dans les coefficients: 0.0883 et 0.0558 pour les panneaux latéraux (la différence s'explique par l'erreur statistique) et 0.6553 pour le panneau central.

Cet indice ainsi calculé pourrait être une bonne évaluation du vrai niveau global d'éblouissement subjectif du sujet. Mais, dans notre expérience, il existait une incohérence. En effet, tout au long de l'expérience les sujets étaient soumis à la même série de questions. Or, il existait certaines situations où toutes les lampes n'étaient pas allumées. Cela signifie que les sujets devaient parfois s'exprimer sur l'éblouissement provenant de lampes éteintes. Appliquer la formule en comptabilisant ces réponses-là revient à augmenter artificiellement l'éblouissement ce qui ne correspond pas à la réalité. Pour lever cette ambiguïté, il suffit d'ôter toutes les réponses des sujets correspondant à des lampes éteintes. Ainsi nous pouvons exprimer SEGS comme suit:

$$\text{SEGS} = \mu_1 \text{ SEL} + \mu_2 \text{ SEG} + \mu_3 \text{ SEM} + \mu_4 \text{ SED}$$

avec

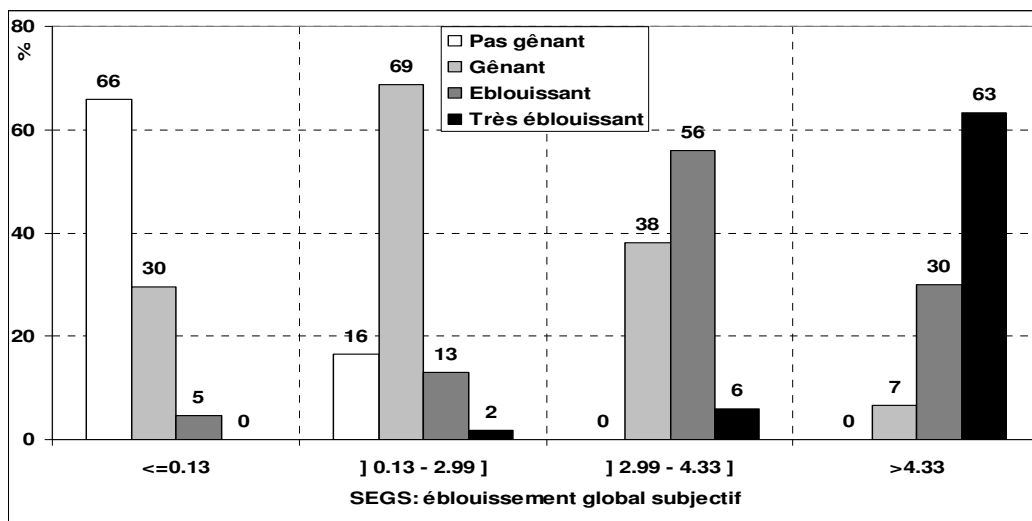
$$\begin{cases} \mu_1 = 0.0995 & \text{si lampes suspendues allumées, 0 sinon} \\ \mu_2 = 0.0883 & \text{si panneau gauche allumé, 0 sinon} \\ \mu_3 = 0.6553 & \text{si panneau en face allumé, 0 sinon} \\ \mu_4 = 0.0558 & \text{si panneau droite allumé, 0 sinon} \end{cases} \quad (\text{eq 4.21})$$

A noter qu'il est possible de généraliser cette formule en toute situation:

$$\text{SEGS} = \sum_{i=1}^n \mu_i(\Omega_i) \text{SES}_i \quad (\text{eq 4.22})$$

avec ici n sources de lumières, Ω_i étant l'angle solide correspondant à la source n^o et SES_i le sentiment d'éblouissement dû à la source n^o.

Ainsi définis, le sentiment d'éblouissement global, étant une variable continue, nécessite une échelle qualitative correspondant à celle des réponses aux questions. Par exemple, peut-on, à partir de quelle valeur de SEGS, parler d'éblouissement. Pour déterminer ces valeurs, la méthode statistique consiste à maximiser le tableau croisé correspondant à la relation entre SEGS et SE. L'indice SE est réparti en 4 catégories issues directement des réponses: pas gênant, un peu gênant + gênant (ces deux catégories sont rassemblées), éblouissant et très éblouissant. Quant à SEGS, il est réparti en 4 fourchettes, composées de 3 valeurs de référence déterminées de telle manière que le tableau croisé déduit ait un χ^2 maximum. (cf figure 4.67)



	SEGS ≤ 0.13	≤ 2.99	≤ 4.33	>4.33	Totaux
Pas gênant	29	29	0	0	58
Gênant	13	121	32	2	168
Eblouissant	2	23	47	9	81
Très éblouissant	0	3	5	19	27
Totaux	44	176	84	30	334

$\chi^2 = 287, df=9, p < < 1\%$

Figure 4.67 Tableau mettant en relation les valeurs SEGS, calculées à partir de la formule (4.21), et les réponses des sujets. Les fourchettes pour SEGS ont été calculées pour maximiser le χ^2 du tableau croisé.

Ce tableau croisé permet donc de donner à l'indice SEGS une échelle qualitative cohérente :

Fourchette	Appréciation	Probabilité figure 4.67
SEGS ≤ 0.13	Pas de gêne	66% de probabilité
0.13 < SEGS ≤ 2.99	Gêne	69% de probabilité
2.99 < SEGS ≤ 4.33	Eblouissement	56% de probabilité
SEGS > 4.33	Très éblouissant	63% de probabilité

Tableau 4.9 Constitution d'une échelle qualitative pour l'indice SEGS d'après les taux correspondant au tableau croisé 4.66.

On voit donc sur ce tableau que l'éblouissement est susceptible de se manifester quand SEGS atteint la valeur de 2.99.

Etude de SEGS en fonction d'UGR:

Le photoluminancemètre numérique nous ayant permis de mesurer certains paramètres photométriques, il était alors possible d'étudier l'indice UGR d'éblouissement. Si nous avons mis en évidence une forte corrélation (0.799) entre UGR et SEGS, le graphique présenté à la figure 4.68 montre cependant que cette corrélation était purement artificielle, en effet, on y distingue deux nuages de points assez distants qui induisent donc une corrélation importante mais erronée.

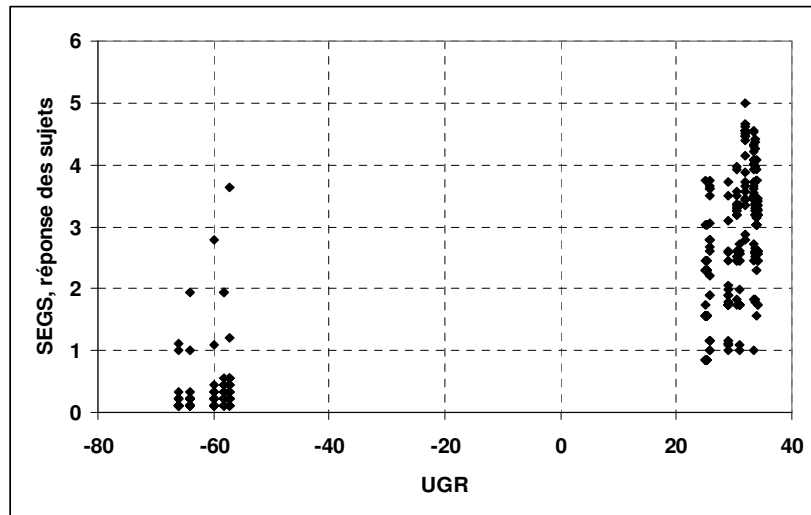


Figure 4.68 Comparaison entre les réponses réelles des sujets à l'éblouissement et les réponses calculées par le modèle UGR. La corrélation est ici de 0.799.

On peut trouver deux explications à cette mauvaise cohérence entre les deux indices:

- de part sa formulation même (faisant intervenir une somme plutôt qu'une intégrale), cet indice est adapté aux sources de lumière artificielle peu étendues géométriquement. Or, dans notre cas, les panneaux lumineux simulant des fenêtres représentaient, par rapport à des lampes classiques, des surfaces très importantes.
- L'indice UGR est basé sur les données expérimentales de Guth (réf. [40], [41], [42], [43]) qui ne tiennent pas compte de la sensibilité à l'éblouissement des sujets alors que, dans notre groupe, ce paramètre variait beaucoup d'un individu à l'autre.

Validation de l'indice SEGs en fonction du nouveau modèle d'éblouissement:

L'indice UGR n'ayant pas donné satisfaction, nous avons conçu un indice d'éblouissement susceptible d'être en meilleure adéquation avec les sentiments des sujets. De plus, le modèle (cf. équation 4.18) ayant été développé pour caractériser la perception de luminosité et d'éblouissement de la tâche, il apparaissait logique d'appliquer un modèle semblable avec l'éblouissement de l'environnement.

Toutefois, deux paramètres du modèle concernant la tâche ne pouvaient pas être immédiatement intégrés dans le cas de l'entourage, à savoir, la température de couleur et la valeur physiologique L_m . La température de couleur, dont l'influence est d'ailleurs faible, n'ayant pas varié dans le cas de l'expérience de laboratoire, n'intervient pas ici. Concernant la luminance physiologique L_m dont l'influence est plus grande, il faut tenir compte du fait que seulement 12 sujets ayant participé à cette 10^{ème} séance ont passé le test C45, ce qui impliquait donc des données manquantes. Nous avons contourné ce dernier problème en procédant aux deux étapes suivantes:

Dans un premier temps nous avons défini un indice "intermédiaire" qui permet d'approcher la notion de sensibilité à l'éblouissement des sujets. Cet indice, que nous nommerons IS (indice de sensibilité) n'est autre que la valeur SEGs des sujets dans le cas de la situation n°8, qui était la plus lumineuse de toutes et donc a priori la plus éblouissante. Cet indice nous a permis d'étudier les coefficients du modèle pour l'ensemble des données de l'expérience.

Dans un deuxième temps, nous avons sélectionné les 12 sujets ayant passé le test afin, d'une part, de déterminer l'influence de L_m et, d'autre part, de déterminer la cohérence des valeurs des coefficients du modèle déterminées avec l'ensemble des 20 sujets.

Elaboration de l'indice SEGS pour l'ensemble des sujets sans de leur valeur L_m

Procédant ainsi, de fortes corrélations sont apparues entre SEGS et les logarithmes de la luminance de la tâche L_t , l'éclairement au niveau des yeux E_y et le degré d'hétérogénéité I , et une moins forte mais significative corrélation avec l'indice de sensibilité IS .

Variabes	Corrélation
$\ln(L_t)$	0.690
$\ln(E_y)$	0.799
$\ln(I)$	0.692
IS	0.135

Tableau 4.10. Valeurs des corrélations entre l'indice SEGS et les 3 variables photométriques L_t , E_y , I et la variable subjective IS

Un modèle analogue à celui décrivant l'éblouissement de la tâche a été introduit:

$$SEGS = \beta_{CE} \ln\left(\frac{E_y I}{L_t(I-I)}\right) + \beta_C \ln(C_c) + \beta_{IS} IS + \beta_R \quad (\text{eq 4.23})$$

Remarque: le terme $\ln(L_t)$ a disparu de l'équation, car il s'agit ici d'éblouissement d'entourage.

Les coefficients ont été estimés au moyen d'un ajustement multilinéaire dont la corrélation était de 0.856:

	Estimations et variances	Test t (loi normale)
β_{EC}	0.525 ± 0.031	17.2
β_C	-2.935 ± 0.433	6.8
β_{IS}	0.309 ± 0.065	4.7
β_R	0.129 ± 0.277	0.5

Tableau 4.11. Estimations, variances et tests de signification des coefficients du modèle.

Tous les coefficients, inscrits dans le tableau 4.11, étaient significativement non nuls, excepté β_R ($t=0.5 < 1.96$). Le fait que β_R soit non significativement différent de zéro est lié à l'existence d'autres variables explicatives.

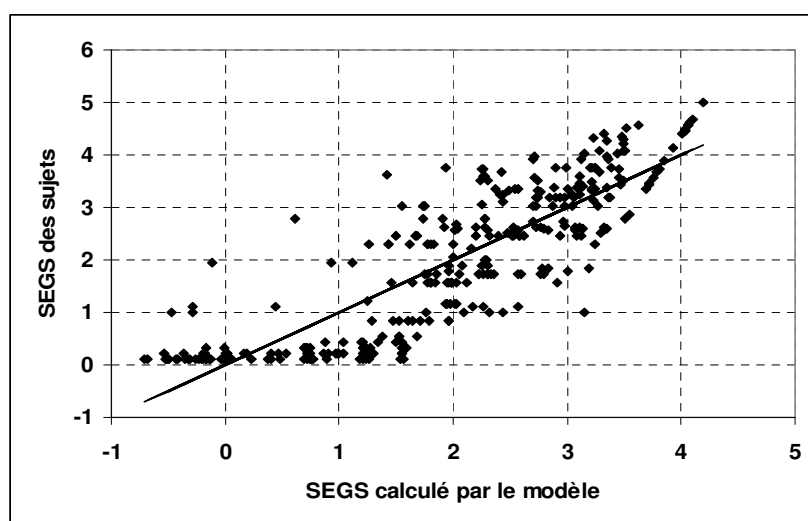


Figure 4.69. Relation entre les réponses des sujets à l'éblouissement et les valeurs calculées par le modèle. La corrélation était ici de 0.856.

Ce graphique peut être comparé avec celui de la figure 4.68. En effet, le nuage de points montre ici une corrélation non artificielle, au contraire de l'indice UGR.

Elaboration de l'indice SEGS pour l'ensemble des sujets qui ont passé le test C45

Dans ce cas le modèle a pris la forme suivante:

$$SEGS = \beta_{CE} \ln\left(\frac{E_Y I}{L_t(1-I)}\right) + \beta_C \ln(C_c) + \beta_L \ln(L_m) + \beta_R \quad (\text{eq 4.24})$$

L'estimation des coefficients donne les valeurs suivantes:

	Estimations et variances	Test t (loi normale)
β_{EC}	0.583 ± 0.040	14.7
β_C	-2.331 ± 0.560	4.2
β_L	-0.163 ± 0.051	3.2
β_R	1.866 ± 0.162	11.5

Tableau 4.12. Estimations, variances et tests de signification des coefficients du modèle pour les 12 sujets soumis au test C45.

Les quatre coefficients sont significativement non nuls, ce qui permet de valider ce modèle. La corrélation vaut 0.869.

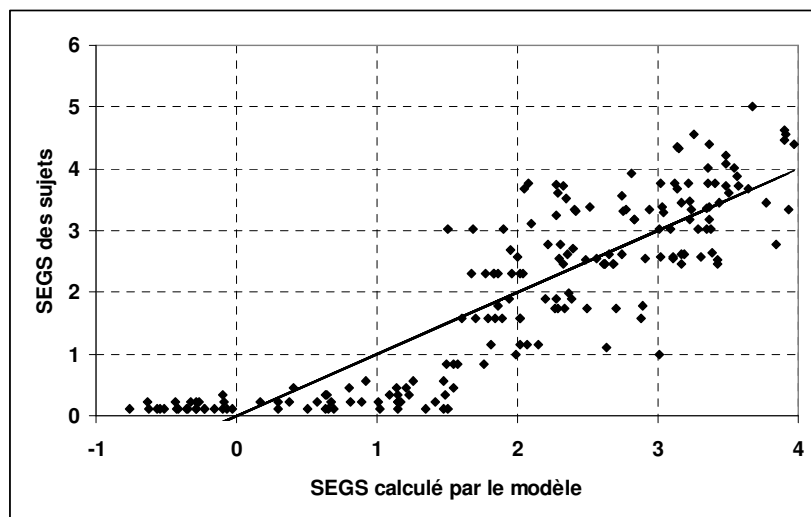


Figure 4.70. Relation entre les réponses des sujets à l'éblouissement et les valeurs calculées par le modèle tenant compte de L_m . La corrélation est ici de 0.869.

Pour des valeurs de l'indice SEGS calculé inférieures à 1, on observe sur ce graphique un cumul des valeurs. Ce phénomène s'explique par le nombre fini de réponses possibles. Le modèle, n'étant lui pas borné, reflète mieux la perception réelle des sujets.

Les coefficients β_{EC} et β_C estimés pour l'ensemble des 20 sujets sont comparés à ceux estimés dans le sous-groupe de 12 sujets.

	12 sujets	20 sujets	Test t (loi normale)
β_{EC}	0.524 ± 0.036	0.472 ± 0.028	1.14
β_C	-2.095 ± 0.503	-2.638 ± 0.389	0.85

Tableau 4.13. Tests statistiques pour valider la cohérence du modèle pour le sous-groupe de 12 sujets comparé au groupe complet.

Ce tableau montre bien que les coefficients estimés dans le sous-groupe ont significativement la même valeur dans les deux groupes.

A partir du nuage de points représenté dans la figure 4.70, il est possible d'établir la probabilité d'éblouissement en prenant pour critère la valeur de SEGS correspondant à l'éblouissement donné dans par le tableau 4.9 (SEGS > 2.99).

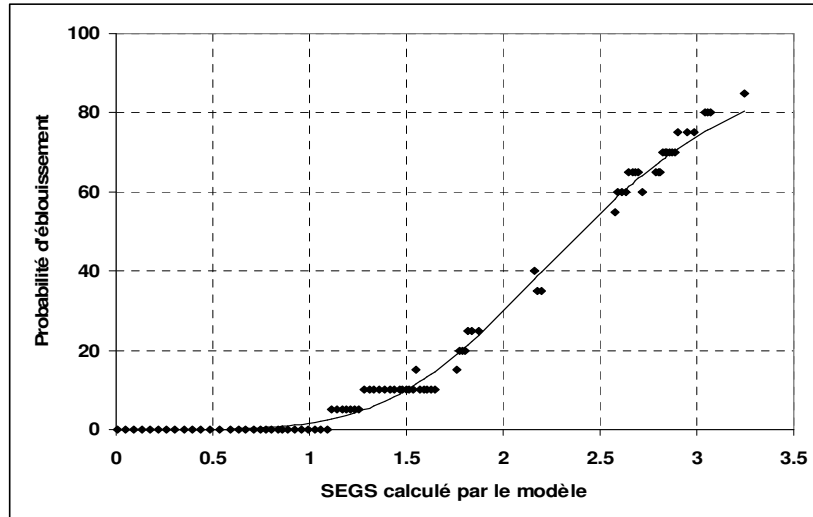


Figure 4.71. Probabilités PEE de ressentir l'environnement comme éblouissant, en fonction de l'indice SEGS de sentiment d'éblouissement décrit par le modèle. La courbe correspond à la fonction du modèle de probabilité PEE dont l'équation est représentée ci-dessous. La corrélation avec les points mesurés est de 0.997.

Le modèle de la probabilité PEE est le suivant :

$$PEE(SEGS) = 100 \frac{SEGS^{4.68}}{SEGS^{4.68} + 2.40^{4.68}} \quad (\text{eq 4.25})$$

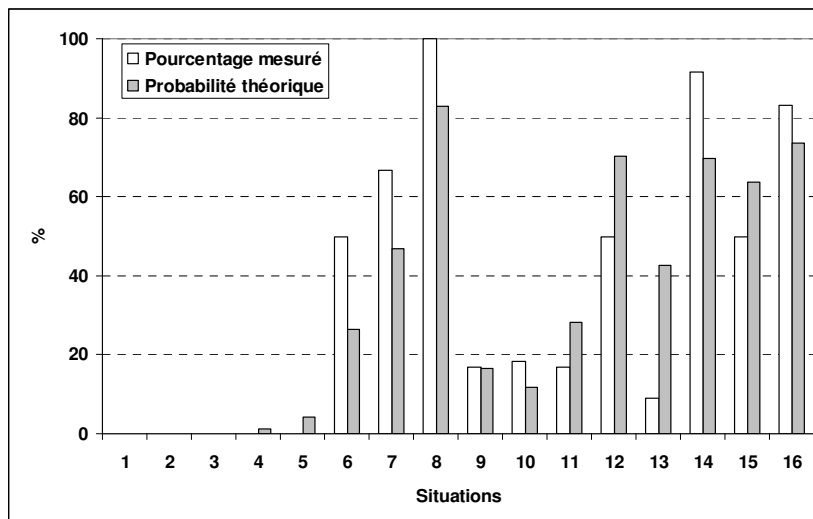


Figure 4.72. Pourcentage de sujets éblouis (SEGS>2.42) comparé à la probabilité moyenne théorique calculé à partir du modèle, pour chaque situation. La corrélation entre les deux distributions est de 0.899.

La différence entre les deux variables était significative pour les situations 6, 7 et 8, comme pour le cas de la perception de luminosité (voir graphique 4.71). Pour les autres situations, le modèle a été cohérent. Il y a donc 3 situations sur 16 pour lesquelles le modèle est mauvais, mais ce nombre ne sort pas de la variabilité statistique.

4.4.4. Acuité visuelle et confort visuel

Rappelons l'hypothèse du rôle essentiel de l'acuité dans le confort visuel, d'où la nécessité d'en étudier les principaux facteurs de variations. Il s'agissait de connaître la contribution spécifique d'un manque de performance induit par des conditions lumineuses qui, par ailleurs, pouvaient être ressenties en elles-mêmes comme inconfortables.

4.4.4.1. Acuité en contraste positif

Estimation de l'acuité

L'acuité a été établie de deux manières : d'une part, avec le test sur écran avec des réglages allant de 5 à 120 cd/m² et, d'autre part, avec le test sur table lumineuse avec des réglages allant de 30 à 1000 cd/m². Dans ce cas, il fallait prendre en compte les variations supplémentaires dues aux réflexions diverses en fonction des situations.

Les acuités (A) des deux types de tests ont été rassemblées afin d'avoir une dynamique plus importante en terme de luminance. Ainsi nous avons pu disposer de 2518 tests pour évaluer au moyen du J-index (cf. § 2.2.2) la perte d'acuité en fonction des situations.

Nous avons testé l'indice J (J-index) qui correspond à la perte relative d'acuité engendrée par la configuration lumineuse du champ visuel. Dans cet indice, l'acuité réelle A dépend de l'acuité physiologique potentielle maximale A_{max} :

$$A = A_{max}(1 - J),$$

A_{max} peut être défini de deux manières:

1:- $A_{max} = f V_m$ où V_m est l'acuité du sujet mesurée à l'aide du test standard C45.

2:- $A_{max} = f A_{tes}$ où A_{tes} étant l'acuité du sujet mesurée à l'aide du test sur écran en condition standard (au cours de l'expérience en local prototype).

Dans ces deux formules, f est un coefficient à déterminer pour le meilleur ajustement de la fonction (le "fit" des mathématicien).

Les corrélations sont de 0.530 pour le cas No 1 et de 0.588 pour le cas No2. Le coefficient f a pour valeurs 2.654 ± 0.022 dans le cas n°1 et 2.910 ± 0.024 dans le cas n°2. Le cas n°2 est donc nettement meilleur, ce qui s'explique par le simple fait que, contrairement au test C45, le test sur écran, tout comme les tests sur table lumineuse, se faisait en contraste positif.

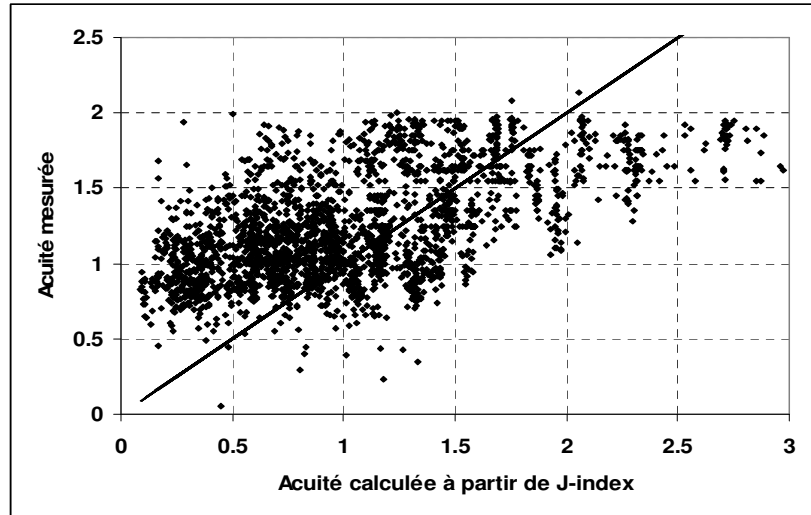


Figure 4.73. Comparaison de l'acuité calculée à partir de J-index (tenant compte de A_{tes}) et de l'acuité (A) mesurée à travers les différents tests des sujets. La corrélation correspondant à ce nuage de points est de 0.588.

Pour chaque test, on procède au calcul de la variance ΔA de A à l'aide de l'équation A.34 décrite dans l'annexe. Cette variance est assimilée à une variance intra-classes.

$$S^2 = \frac{1}{nt-2} \sum_{i=1}^{nt} \Delta A_i^2, \quad (\text{eq 4.26})$$

où nt correspond au nombre total de tests réalisés au cours de l'expérience. la variance résiduelle due au modèle (S_m) est donnée par l'équation eq 4.27 :

$$S_m^2 = \frac{1}{nt-2} \sum_{i=1}^{nt} (A_{calculée_i} - A_i)^2 = \frac{nt}{nt-2} \sigma_A^2 (1 - R^2) \quad (\text{eq 4.27})$$

A_m = Acuité mesurée; A_c = A calculée.

R = coefficient de corrélation et σ_A^2 la variance des acuités.

Ici, cette variance est assimilée à une variance "inter-classes".

Selon ce test, ces deux variances devraient être comparables, or ici ce n'est pas le cas, les deux valeurs étant respectivement de $S=0.159$ et $S_m=0.282$. Cet écart, qui est relativement grand, peut s'expliquer par le fait, qu'indépendamment de la variabilité statistique due à la méthode employée pour mesurer l'acuité, il existait aussi une source de variabilité due à l'individu lui-même (état de fatigue visuelle, variation de concentration etc.).

Nous avons également testé l'autre hypothèse de modélisation, basée sur la fonction de transfert (cf. § 2.2.3) et qui fait intervenir essentiellement la luminance de la tâche.

$$A = 4 A_{\max} \frac{L_t^\gamma L_{\text{Opt}}^\gamma}{(L_t^\gamma + L_{\text{Opt}}^\gamma)^2} \quad (\text{eq 4.28})$$

Dans cette équation qui prend en compte la luminance de la tâche L , A_{\max} , correspond à l'acuité maximale qu'un individu pourrait obtenir dans une situation optimale. Il s'agit donc d'une variable physiologique. Cette valeur dépend d'autres variables physiologiques établies dans des conditions standard, soit les valeurs p , V_1 et V_m du test C45 (p , V_1 , et V_m) et la valeur A_{tes} du test sur écran en condition standard. La fonction qui s'est avérée la plus représentative était du type suivant:

$$A_{\max} = \mu_1 (p + \mu_2 V_1)^{\mu_3} A_{tes}^{\mu_4} \quad (\text{eq 4.29})$$

où μ_1 , μ_2 , μ_3 et μ_4 sont des coefficients à déterminer par ajustement non linéaire (par le "fit").

Dans l'équation, L_{Opt} correspond à la luminance optimale de la tâche, celle qui permet une acuité maximale. Cette luminance dépend à la fois des conditions lumineuses du champ perçu entourant la tâche et de la variable physiologique L_m .
La fonction qui la représente le mieux est la suivante:

$$L_{Opt} = \varepsilon_1 L_m^{\varepsilon_2} EE^{\varepsilon_3} L_{eq}^{\varepsilon_4} L_{me}^{\varepsilon_5} L_{mp}^{\varepsilon_6} \quad (\text{eq 4.30})$$

Avec EE , L_{me} , L_{mp} et L_{eq} , les variables photométriques correspondant à l'environnement (voir définitions dans l'annexe A.).

Rappelons que l'estimation de la luminance de l'environnement donnée par $L_{EQ} = EY \left(\frac{I}{1-I} \right)^k$ correspond à une moyenne géométrique des principales variables photométriques.

Pour des raisons de facilitation des calculs, nous présentons la fonction d'ajustement ("fit") de la manière suivante:

$$A = 4 \tau_6 (\rho + \mu_2 V_1)^{\mu_3} A_{tes}^{\mu_4} \frac{L_t^\gamma L_O}{(L_t^\gamma + \tau_0 L_O)^2} \quad (\text{eq 4.31})$$

avec $L_O = L_m^{\tau_1} EE^{\tau_2} L_{eq}^{\tau_3} L_{me}^{\tau_4} L_{mp}^{\tau_5}$

Ce qui fait pas moins de 12 constantes à estimer par "fit":

$\mu_2, \mu_3, \mu_4, \tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \gamma$ et k

	Estimations et variances	Test t (loi normale)
μ_2	-0.253 ± 0.006	43.4
μ_3	-0.016 ± 0.006	2.6
μ_4	0.362 ± 0.016	23.2
τ_0	46.01 ± 3.892	11.8
τ_1	0.094 ± 0.013	7.0
τ_2	0.878 ± 0.084	10.5
τ_3	0.997 ± 0.101	9.9
τ_4	-1.454 ± 0.124	11.7
τ_5	-0.596 ± 0.056	10.6
τ_6	79.80 ± 9.485	8.4
γ	0.066 ± 0.009	7.3
k	0.292 ± 0.020	14.9

Tableau 4.14. Estimations, variances et tests de signification des 12 constantes du modèle. Toutes les valeurs sont significativement non nulles.

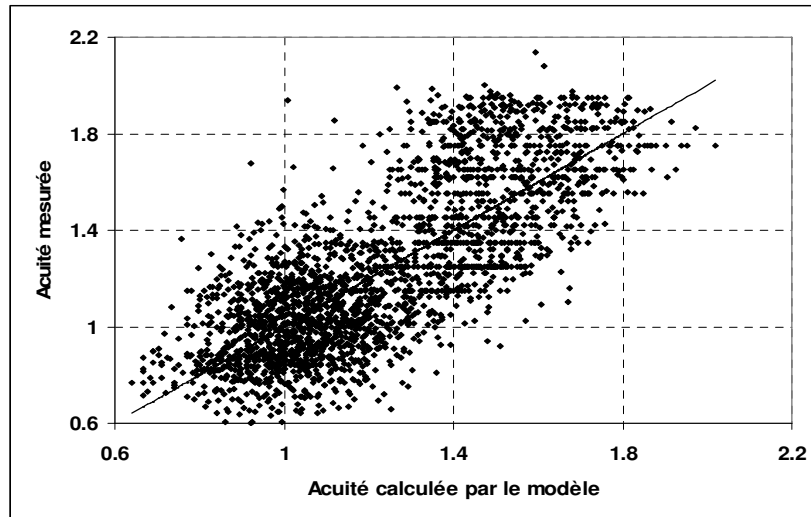


Figure 4.74. Comparaison de l'acuité calculée à partir du nouveau modèle, et de l'acuité (A) mesurée à travers les différents tests des sujets. La corrélation correspondant à ce nuage de point était de 0.767.

Probabilité d'un manque de performance d'acuité (PMP) induit par les conditions lumineuses

Dans l'équation 4.31, il faut rajouter la fonction du contraste modélisée par l'équation 4.5. Par analogie avec l'éblouissement, on estime la probabilité (PMP) de manque de performance, ce qui revient à estimer la probabilité que, pour une acuité calculée par le modèle (A_C), l'acuité réelle du sujet soit inférieure à une certaine acuité exigée (A_E). Le modèle de probabilité est toujours du même type que l'équation 4.15, ce qui donne dans ce cas:

$$PMP(A_C, A_E) = 100 \frac{A_0^k}{A_0^k + A_C^k} \quad (\text{eq 4.32})$$

avec A_0 et k fonctions de A_E .

Nous avons pu établir que les meilleures estimations de $A_0(A_E)$ et $k(A_E)$ étaient fournies par les équations suivantes:

$$\begin{cases} A_0(A_E) \approx 2.172 A_E^3 - 8.702 A_E^2 + 12.281 A_E - 4.713 \\ k(A_E) \approx -25.938 A_E^2 + 70.371 A_E - 35.636 \end{cases} \quad (\text{eq 4.33})$$

La figure 4.75 montre l'adéquation entre le modèle représenté par les équations 4.32 et 4.33 et les observations en terme de pourcentages.

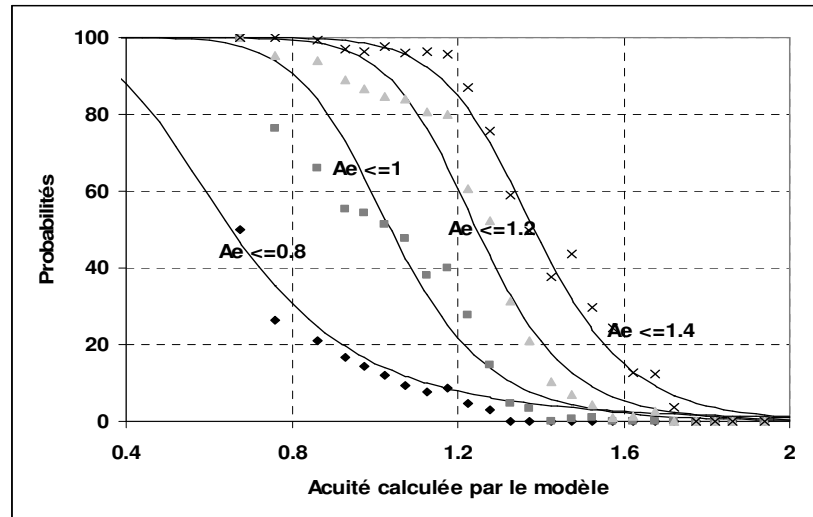


Figure 4.75. Probabilité qu'un sujet donné dans une situation fixée (caractérisés par une acuité calculée par le modèle (eq 4.34), aurait une acuité (A) réelle inférieure à une acuité exigée (Ae) donnée.

4.4.4.2. Acuité en contraste négatif

Etude du modèle acuité – luminance avec optotype en contraste inversé

Nous avons testé l'hypothèse que l'équation 2.29 permettait d'expliquer la courbe "acuité – luminance" en contraste inversé, au moyen du test de la table lumineuse munie d'une planche d'optotypes clairs sur fond noir.

On demandait d'abord au sujet d'augmenter la luminance du caractère jusqu'à ce qu'il détecte un optotype de taille donnée, puis, il devait continuer à augmenter cette luminance jusqu'à être suffisamment ébloui pour ne plus pouvoir reconnaître le caractère. Ces opérations étaient répétées pour différentes tailles de l'optotype, permettant d'en déduire une courbe acuité – luminance du caractère pour laquelle on testait l'équation 2.29. Utilisant la table lumineuse comme test, cela signifiait que le contraste "caractère fond" était non seulement constant, mais aussi très élevé (0.995, c'est-à-dire voisin de 1). C'est pourquoi nous avons pris en compte l'équation 2.29 possédant les six paramètres suivants: A_m , β , α_0 , β_0 , α_m et β_m que l'on doit estimer à l'aide d'une régression non linéaire.

En rappelant l'équation 2.29,

$$A = 4 A_m \frac{(L_C [1 - \alpha_0 (1 - C)] - \beta_0)^\beta \cdot (1 - C) [\alpha_m - \alpha_0] L_C + \beta_m - \beta_0)^\beta}{\left[(L_C [1 - \alpha_0 (1 - C)] - \beta_0)^\beta + (1 - C) [\alpha_m - \alpha_0] L_C + \beta_m - \beta_0)^\beta \right]^2}$$

La corrélation trouvée est de 0.976.

	Estimations et variances	Test t (loi normale)
A_m	1.090 ± 0.028	38.3
β	0.656 ± 0.043	15.2
α_0	1.001 ± 0.00012	8.3(*)
β_0	0 ± 0.04	0
α_m	10.060 ± 2.871	3.5
β_m	5.009 ± 0.607	8.3

Tableau 4.15. Estimations, variances et tests de signification des coefficients du modèle représenté par l'équation 2.29. Tous ces coefficients sont significativement non nuls sauf β

(*) nous avons testé si α_0 vaut 1.

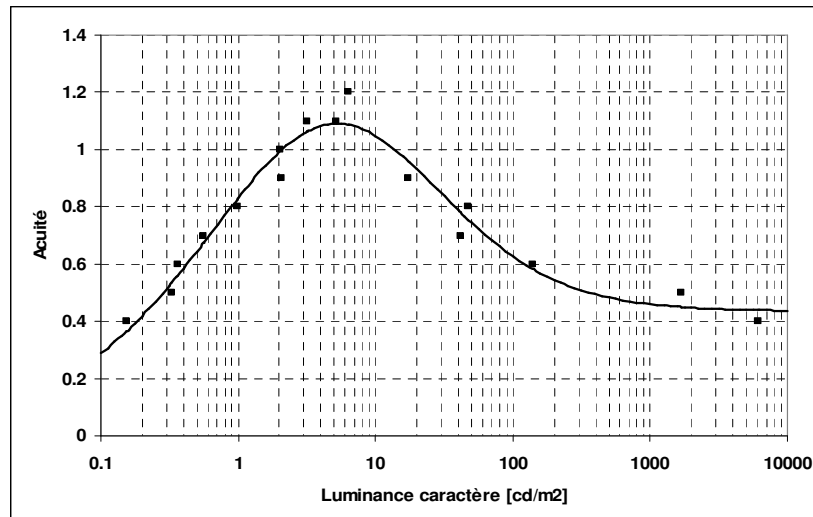


Figure 4.76. Courbe "acuité - luminance" du caractère pour un contraste avec le fond constant (soit un contraste de 0.995). Les points correspondent aux mesures pour un sujet donné et la courbe au modèle donné par l'équation 2.29, la corrélation entre les deux est de 0.976.

On voit donc que le modèle "acuité – luminance" du caractère en contraste négatif proposé explique bien la réalité pour le cas particulier que nous venons d'étudier.

Evaluation de l'effet de l'environnement

L'expérience consistait à exécuter des tests d'acuité visuels en contraste négatif (A_N) à l'aide d'une table lumineuse. Rappelons que les sujets devaient d'abord ajuster, pour chacune des 16 situations proposées, le réglage de la luminance de la table lumineuse à une valeur de confort. Ce réglage qui se faisait en contraste positif (caractères sombres sur fond clair) était chaque fois suivi d'un test d'acuité. Après quoi, les sujets effectuaient un test d'acuité en contraste négatif en conservant le même réglage. Ce test permettait ainsi de comparer pour une même luminance l'acuité en contraste négatif (A_N) par rapport à celle obtenue en contraste positif (A_P). A noter que cette même luminance du fond en contraste positif (fond clair) et des caractères en contraste négatif (caractères clairs), correspond à des conditions physiologiques très différentes.

L'analyse des 294 données disponibles (16 situations x 21 sujets = 336 moins les données manquantes) a révélé deux faits: d'une part, les deux acuités étaient fortement corrélées ($R = 0.751$) ; d'autre part, dans 97% des cas l'acuité en contraste négatif était plus faible que celle en contraste positif.

Cette corrélation indique une relation entre les deux acuités du type: $A_N = \mu A_P + v$, avec $\mu = 0.798$ et v dépendant essentiellement de l'éclairement au niveau des yeux (EY) (corrélation significative de 0.581 avec le logarithme de EY).

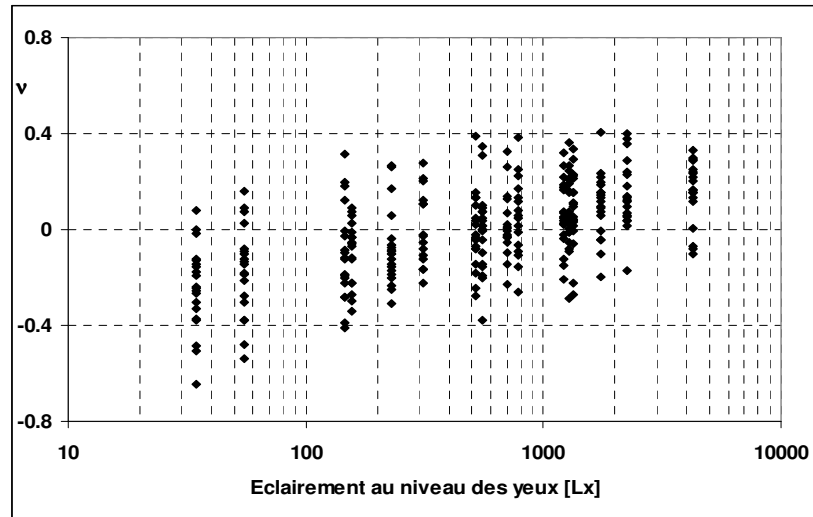


Figure 4.77. Comparaison de la différence: $v = A_N - \mu A_P$ avec l'éclairement au niveau des yeux (EY). La corrélation correspondant à ce nuage de points est de 0.581.

On observe d'abord que l'augmentation de l'éclairement au niveau des yeux, représentatif de l'entourage lumineux, a pour effet d'améliorer la performance visuelle en contraste négatif. D'après ce graphique on peut penser que, si cet environnement est suffisamment lumineux, l'acuité en contraste négatif pourrait être supérieure à celle en contraste positif. Dans le cadre de l'expérience, l'acuité en contraste négatif a été effectivement supérieure à celle en contraste positif pour 3.7% des cas.

On observe également une saturation pour les forts éclairagements : au-delà de 500 lx, v ne dépassant pas la valeur de +0.4 environ. En fait, l'acuité des sujets étant une réponse physiologique bornée, cette saturation est normale. On peut donc supposer que la courbe $v(EY)$ a une forme en "s", avec $\lim_{EY \rightarrow 0} v(EY) = v_0$ et $\lim_{EY \rightarrow \infty} v(EY) = v_1$, ce qui nous permet

d'introduire la fonction suivante :

$$v(EY) = (v_1 - v_0) \frac{EY^\gamma}{EY^\gamma + E_0^\gamma} + v_0 \quad (\text{eq 4.34})$$

On en déduit l'équation suivante pour l'acuité en contraste négatif :

$$A_N = \mu A_P + v_0 + (v_1 - v_0) \frac{EY^\gamma}{EY^\gamma + E_0^\gamma} \quad (\text{eq 4.35})$$

Par analogie avec le cas de l'acuité en contraste positif, traité dans le paragraphe précédent, nous avons supposé que v_0 et v_1 étaient dépendants de paramètres physiologiques de la façon suivante :

$v_0 = \mu_0 (p + kV_1)^{\tau_0} A_{tes}^{\tau_1}$ et $v_1 = \mu_1 (p + kV_1)^{\tau_0} A_{tes}^{\tau_1}$ où p , V_1 et A_{tes} sont les paramètres physiologiques.

Dans cette équation, figurent 7 paramètres (μ , μ_0 , μ_1 , γ , τ_0 , τ_1 et E_0) à estimer à l'aide d'un fit non linéaire.

	Estimations et variances	Test t (loi normale)
μ	0.587 ± 0.020	29.5
μ_0	0.0104 ± 0.027	0.4
μ_1	0.955 ± 0.073	13.1
k	-0.219 ± 0.030	7.4
τ_0	0.231 ± 0.073	3.2
τ_1	1.000 ± 0.179	5.6
γ	0.500 ± 0.194	2.6
E_0	0.997 ± 0.101	9.9

Tableau 4.16. Estimations, variances et tests de signification des coefficients du modèle. Tous ces coefficients sont significativement non nuls, excepté pour m_0 que l'on peut assimiler à 0.

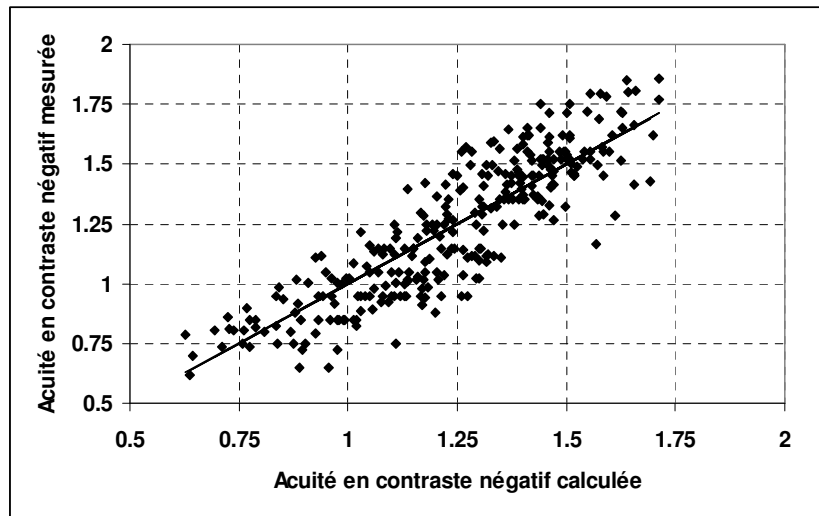


Figure 4.78. Comparaison de l'acuité (contraste négatif) calculée, et de l'acuité mesurée à travers les différents tests des sujets. La corrélation correspondant à ce nuage de points est de 0.878.

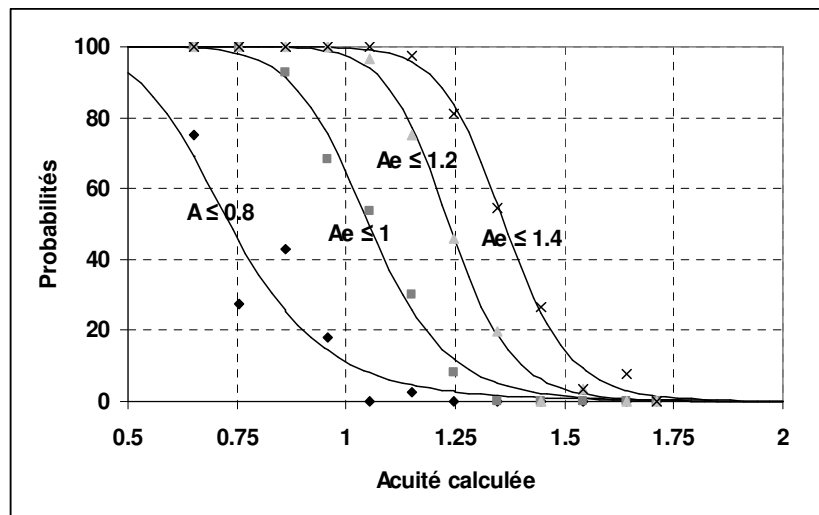


Figure 4.79. Probabilité qu'un sujet donné dans une situation fixée (caractérisée par une acuité calculée par le modèle), aurait une acuité en contraste négatif (A_n) réelle inférieure à une acuité exigée (A_e) donnée.

CHAPITRE V

DISCUSSION

5.1 Résumé des résultats

Les expériences décrites dans ce travail nous ont permis de définir quatre indicateurs d'inconfort visuel. Les deux premiers concernent les réactions à la luminosité de la tâche considérée comme étant soit trop sombre soit trop lumineuse, voire éblouissante, le troisième concerne l'éblouissement de l'environnement et le quatrième la performance visuelle. Peut-on déterminer leurs causes physiologiques et, donc, les paramètres de la stimulation lumineuse leur correspondant, c'était la question posée.

Soit un individu donné effectuant une tâche visuelle dans un contexte lumineux donné.

Le profil visuel du sujet est estimé par les paramètres L_M , V_M , p , $V1$ (tirés de sa courbe acuité-luminance du test de référence C45), et A_{TES} (tiré de la relation acuité-contraste du test sur écran en situation standard).

La situation lumineuse, auquel ce sujet est soumis, se caractérise par les paramètres suivants :

- la luminance de la tâche (écran ou document imprimé: L_T);
- l'éclairement reçu par les yeux (E_Y);
- le facteur d'hétérogénéité de la distribution de lumière (I);
- le contraste entre le caractère et le fond de la tâche (C_C),
- la température de couleur de la tâche (T_T).

Les indicateurs d'estimation de l'inconfort que l'expérience a permis de valider sont:

- SL: sentiment de luminosité procuré par la tâche (écran ou document imprimé) ;
- SEGS: sentiment d'éblouissement global subjectif (éblouissement dû à l'ambiance lumineuse environnante) ;
- A_P et A_N : acuité visuelle en contraste respectivement positif et négatif.

Conformément au modèle ergonomique, l'expérience a pu mettre en évidence la liaison qu'ont ces indicateurs, d'une part, avec le profil visuel des individus et, d'autre part, avec les variables photométriques principales de la stimulation, à savoir, l'éclairement pupillaire et la luminance de la tâche. Les équations prédictives de ces indicateurs sont résumées ci-dessous.

5.1.1. Sentiment de luminosité (SL)

Le sentiment de luminosité (SL) que procure la tâche est donné par les équations suivantes, correspondant respectivement, l'une à une tâche de lecture sur écran, l'autre à une tâche de lecture sur un document :

Cas de l'écran:

$$SL = 0.990 \ln(L_T) - 0.107 \ln\left(\frac{E_Y I}{(1-I)L_T}\right) + 1.274 \ln(C_C) + 0.213 \ln(L_M) - 2.045 \ln(T_T) + 16.949$$

(eq 5.1)

Cas du document imprimé:

$$SL = 0.454 \ln(L_T) - 0.107 \ln\left(\frac{E_Y I}{(1-I)L_T}\right) + 1.274 \ln(C_C) + 0.213 \ln(L_M) - 2.045 \ln(T_T) + 16.949$$

(eq 5.2)

Les équations 5.1 et 5.2 montrent une différence concernant le type de tâche, le facteur du paramètre $\ln(L_T)$ étant significativement plus élevé pour l'écran que pour le document. Cela signifie, qu'à luminance égale, l'écran paraît globalement plus clair que le document sur papier. Deux facteurs les différencient principalement : la dimension angulaire qu'ils

prennent dans le champ visuel (différence toutefois assez faible) et surtout la fréquence de vibration de la lumière provenant de ces deux objets. En effet, la lumière du papier provient de la réflexion sur celui-ci des diverses sources lumineuses de la zone expérimentale. Ces sources étant stabilisées au moyen de ballasts électroniques à haute fréquence, il en résultait une vibration infime, imperceptible pour l'œil humain (réf. [74]), La lumière de l'écran était, quant à elle, caractérisée par une fréquence de balayage de 75 Hz, reconnue pour produire des effets perceptifs plus ou moins conscients. L'hypothèse est alors que la vibration lumineuse est susceptible d'engendrer un phénomène de surbrillance.

Les équations montrent que le sentiment de luminosité résulte de la combinaison de 5 paramètres principaux.

- 1) Le contraste "entourage-tâche" (C_{et}), symbolisé par le rapport $\frac{E_Y I}{(1-I)L_T}$ qui a, comme attendu, une influence opposée à la luminance de la tâche.
- 2) Le facteur d'hétérogénéité (I) de la distribution de luminance joue également un rôle sur le contraste "entourage-tâche": moins l'environnement lumineux est hétérogène plus le contraste entre l'entourage et l'écran où le document imprimé est fort.
- 3) Plus le contraste "caractère-fond" (C_t) est élevé plus la luminosité paraît élevée. Cette propriété provient d'un phénomène physiologique désigné par "inhibition latérale" qui correspond à une interaction entre les cônes de la rétine, dont l'effet est d'augmenter les contrastes: les blancs deviennent plus clairs et les noirs plus sombres. Ainsi, plus le contraste physique augmente, plus la tâche paraît lumineuse.
- 4) L'influence du profil visuel est déterminée par la luminance physiologique (L_m) du test C45 qui intervient dans l'équation comme paramètre positif: il semblerait que plus cette luminance est élevée, plus la tâche paraît claire. Autrement dit, à luminance de tâche égale, un sujet ayant une valeur élevée de L_m semblerait voir la tâche comme plus claire qu'un sujet ayant une valeur plus faible de L_m .
- 5) Reste l'influence de la température de couleur de la tâche. Il semblerait que plus le blanc du fond de l'écran paraît bleuté, c'est-à-dire, "froid" (ce qui correspond à une élévation de la température de couleur T_T), plus ce fond paraît sombre. Nous pensons que cette influence devrait être approfondie, car il faudrait tenir compte du spectre d'émission de l'écran, ainsi que du contraste de couleur entre la tâche et son entourage.

5.1.2. Sentiment d'éblouissement dû à l'environnement (SEGS)

Le sentiment d'éblouissement dû à l'environnement (SEGS) est décrit par l'équation suivante:

$$SEGS = 0.524 \ln \left(\frac{E_Y I}{L_T (1-I)} \right) - 2.095 \ln(C_c) - 0.147 \ln(L_m) + 1.677 \quad (\text{eq 5.3})$$

Comme les équations 5.1 et 5.2, l'équation 5.3 montre l'influence des paramètres physiologiques et photométriques sur l'éblouissement. Les facteurs, dont dépend cet éblouissement, sont: 1) le contraste de luminosité entre l'environnement et la tâche ; 2) le contraste "caractère-tâche" (C_c) - on a constaté qu'une perte de contraste de l'écran par effet d'une forte lumière incidente, était associé à un effet d'éblouissement global -, et 3) la luminance physiologique L_m qui avait un effet inverse sur l'éblouissement au niveau de la tâche, à savoir que, plus les sujets avaient une valeur élevée de L_m , moins ils étaient éblouis.

L'équation 5.3 est comparable aux équations 5.1 et 5.2. Il manque toutefois l'effet de la température de couleur de l'environnement qui n'a pas pu être démontré dans le cadre de l'expérience. L'effet de la température de couleur devrait être approfondie.

5.1.3. Effet de l'environnement lumineux sur l'acuité visuelle (A_p et A_N)

L'indice J-index qui attribue le sentiment d'inconfort à un effet sur la performance du pouvoir séparateur, c'est-à-dire l'acuité visuelle, n'a pu être validé par l'expérience. En effet, les luminances caractérisant l'entourage de la tâche n'ont pas eu l'effet attendu sur l'acuité. Toutefois, nous avons pu déterminer un modèle, basé sur l'interprétation de l'acuité en terme de fonction de transfert de modulation (MTF), qui prend compte les deux types de contrastes, positif (A_p) et négatif (A_N):

Cas du contraste positif A_p

Nous avons introduit dans l'équation 4.24 un terme en fonction du contraste caractère - fond (il s'agit de l'équation 4.4).

$$A_p = 319.2(p - 0.253 V1)^{-0.016} A_{tes}^{0.362} \frac{\ln(C_c) - \ln(C_0)}{\ln(C_0)} \frac{L_t^{0.066} L_O}{(L_t^{0.066} + 46.01 L_O)^2}$$

(eq 5.4)

$$\text{avec } L_O = L_m^{0.094} EE^{0.878} L_{eq}^{0.997} L_{me}^{-1.454} L_{mp}^{-0.596} \quad (\text{eq 5.5})$$

Cas du contraste négatif (A_N):

$$A_N = 0.587 A_p + 0.955(p - 0.219 V1)^{0.231} A_{tes} \frac{EY^{0.5}}{EY^{0.5} + 0.997^{0.5}} \quad (\text{eq 5.6})$$

On retrouve le type d'équation que l'on a avec le modèle de la MTF (cf. équation 2.27) qui engendre une courbe en forme de cloche (cf. figure 2.10). L'acuité augmente avec le logarithme de la luminance de la tâche jusqu'à un maximum au-delà duquel l'acuité diminue. Cet optimum de luminance qui correspond à l'acuité maximum dépend de paramètres photométriques qui caractérisent le champ visuel d'entourage. Cependant, il semblerait, d'après nos expériences, que l'acuité maximale dépende essentiellement de

l'individu ($A_{max} = \frac{319.2}{4} (p - 0.253 V1)^{-0.016} A_{tes}^{0.362}$), ce qui contredirait l'effet Lythgoe. Cela

est probablement dû au fait que l'écran et la table lumineuse utilisés pour les tests étaient caractérisés par une surface angulaire beaucoup plus importante (respectivement 15° et 10°) que la cible de 3° environ utilisée par Lythgoe.

De plus, on peut admettre que les sujets étant très concentrés sur leur tâche, n'étaient plus du tout gênés par l'entourage, du moins n'étaient-ils pas conscients d'un effet d'éblouissement.

Si le modèle déduit de la MTF semble donner une bonne explication de l'acuité visuelle, il faudrait l'approfondir en étudiant notamment l'effet produit par les différentes constantes du modèle (L_m , V_m , β , L_0 , α_0 , α_m , β_m) et aussi celui du seuil de perception du contraste.

5.1.4. Expression des indicateurs en terme de probabilité

Nous avons transformé les indices de perception en termes de probabilités d'insatisfaction qui tiennent compte de la variabilité caractérisant les réactions des sujets d'un collectif donné. Ce sont les indicateurs prédictifs susceptibles d'être standardisés et de figurer dans des recommandations.

Nous avons ainsi élaboré 4 principaux indices qui nous paraissent devoir être pris en compte pour définir le confort visuel lié aux conditions lumineuses. Ces indices sont : 1), PMT, probabilité que la tâche présente un manque de lumière ; 2) PET, probabilité que la tâche soit éblouissante; 3) PEE, probabilité que l'environnement soit éblouissant et 4) PMP, probabilité de produire un manque de performance visuelle. On peut alors décrire le confort attendu pour une situation donnée en terme de ces 4 indices.

$$\text{PMT(SL)} = 100 \frac{3.53^{10.26}}{3.53^{10.26} + \text{SL}^{10.26}} \quad (\text{eq 5.7})$$

$$\text{PET}(\text{SL}) = 100 \frac{\text{SL}^{14.56}}{4.88^{14.56} + \text{SL}^{14.56}} \quad (\text{eq 5.8})$$

$$\text{PEE}(\text{SEGS}) = 100 \frac{\text{SEGS}^{4.68}}{\text{SEGS}^{4.68} + 2.40^{4.68}} \quad (\text{eq 5.9})$$

$$\text{PMP}(A, A_E) = 100 \frac{A_0^k}{A_0^k + A^k} \quad (\text{eq 5.10})$$

avec pour le contraste positif ($A=A_P$):

$$\begin{cases} A_0(A_E) \approx 2.172 A_E^3 - 8.702 A_E^2 + 12.281 A_E - 4.713 \\ k(A_E) \approx -25.938 A_E^2 + 70.371 A_E - 35.636 \end{cases} \quad (\text{eq 5.11})$$

avec pour le contraste négatif ($A=A_N$):

$$\begin{cases} A_0(A_E) \approx 2.768 A_E^3 - 10.294 A_E^2 + 13.395 A_E - 4.811 \\ k(A_E) \approx -57.825 A_E^2 + 152.310 A_E - 80.324 \end{cases} \quad (\text{eq 5.12})$$

5.1.5. Généralisation de l'application des indicateurs de prédiction

En prenant en compte l'ensemble des effets d'éblouissement impliqués par notre modélisation, il est également possible de définir des indices globaux tels que :
 PEG, probabilité d'éblouissement global au niveau de la tâche et de son entourage ;
 PGG, probabilité de gêne globale incluant un effet d'éblouissement global et une gêne par manque de lumière.

PEG est défini comme suit:

$$\text{PEG}(\text{SL}, \text{SEGS}) = \begin{cases} 100 & \text{si } \text{PET}(\text{SL}) + \text{PEE}(\text{SEGS}) \geq 100 \\ \text{PET}(\text{SL}) + \text{PEE}(\text{SEGS}) & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{eq 5.13})$$

Pour déterminer la probabilité de gêne globale PGG, il faut introduire l'équation 5.7, permettant de déterminer la probabilité d'être gêné par un écran (ou document imprimé) trop sombre.

Il faudrait introduire aussi la probabilité d'être gêné par un environnement trop sombre. Or si la luminosité d'un environnement homogène, ou dépourvu de sources lumineuses ponctuelles, peut être jugée par des sujets, la présence de sources éblouissantes rend la prédiction difficile.

Nous avons alors défini l'indice PME (= Probabilité que l'Environnement Manque globalement de lumière) comme prédisant qu'une tâche de luminance égale à celle de la luminance moyenne du champ visuel perçu ($\bar{L} = EY/\pi$), soit jugée trop sombre.

Soit SLE, le sentiment de luminosité attribué à cette tâche:

$$\text{SLE} = \text{SL}(\bar{L}) \quad (\text{eq 5.14}) \text{ au lieu de } \text{SL}(L_T).$$

Ce qui donne :

$$\text{PME}(\text{SLE}) = \text{PMT}(\text{SLE}) \quad (\text{eq 5.15})$$

En d'autres termes, $\text{PMT}(\text{SLE})$ est l'équation 5.7 que l'on applique à SLE et non à SL. Nous en déduisons l'équation pour PGG (voir démonstration dans l'annexe A.1.6) avec ses différentes composantes :

$$PGG(SL, SEGS, SLE) = \begin{cases} PEE(SEGS) + PET(SL) & \text{si } PEE > PMT \text{ et } PET > PME \\ PEE(SEGS) + PME(SLE) & \text{si } PEE > PMT \text{ et } PET \leq PME \\ PMT(SL) + PET(SL) & \text{si } PEE \leq PMT \text{ et } PET > PME \\ PMT(SL) + PME(SLE) & \text{si } PEE \leq PMT \text{ et } PET \leq PME \end{cases} \quad (\text{eq 5.16})$$

5.1.6. Effet Kruthoff

Nous avons pu mettre en évidence la limitation d'utilisation des courbes présentées par Kruthoff qui, conçues pour l'utilisation des tubes fluorescents, ne peuvent s'appliquer quand des sources de lumière de températures de couleurs diverses, telle que la lumière naturelle, se trouvent dans le champ visuel. Le sentiment de froideur ou de chaleur procurée par une ambiance lumineuse, semble donc ne pas dépendre exclusivement du niveau d'éclairage et de la température de couleur des sources impliquées. D'autres facteurs rentrent en ligne de compte tels que:

- Les couleurs des parois
- La brillance des parois
- La sensation de froideur / chaleur procurée par l'ambiance thermique
- Divers autres facteurs psychologiques connus des recherches faites dans le domaine de la couleur.

Outre l'effet Kruthoff, la température de couleur peut avoir une influence sur la sensation de manque ou d'excès de lumière, et d'éblouissement global.

5.2. Méthode de mesure pour l'évaluation des indices

S'agissant d'une problématique intéressant l'ergonomie, il est nécessaire de considérer les aspects techniques de la métrologie dont dépendent les indices.

La plupart des variables photométriques dont dépendent les 4 indices PMT, PET, PEE et PMP sont mesurables de manière simple avec un luminancemètre et un luxmètre. Cependant, l'utilisation d'un photoluminancemètre numérique à angulaire fish-eye apporte un avantage considérable surtout au niveau de la rapidité de mesure. En effet, une méthode de mesure trop lente ne permet pas de tenir compte des variations naturelles de lumière, lesquelles sont souvent très rapides.

Toutefois, dans l'attente d'une possible évolution future de l'appareil, certaines données photométriques ne peuvent se mesurer avec cet appareil, comme par exemple, l'éclairage horizontal - on peut le mesurer indirectement par l'intermédiaire d'une feuille blanche posée à l'endroit où on veut connaître cet éclairage, toutefois la méthode deviendrait trop coûteuse si on veut mesurer plusieurs éclairages horizontaux à la fois, et de plus ces feuilles blanches finiraient par encombrer l'espace visuel et ainsi rendre la mesure non pertinente -, les températures de couleur et aussi la luminance d'un écran cathodique allumé. Si le facteur d'hétérogénéité (voir sa définition mathématique dans l'annexe A.59) ne peut a priori se mesurer qu'à partir du luminancemètre numérique, il existe toutefois des approximations permettant de s'affranchir de l'utilisation de l'appareil.

Dans le cas d'une situation de lumière artificielle pure, les lampes étant généralement de taille angulaire modeste dans le champ visuel, il est alors possible d'estimer une luminance moyenne. Par exemple, on peut prendre quelques points entre la valeur minimale et la valeur maximale de la luminance et en établir la valeur moyenne après avoir déterminé leur angle solide dans le champ visuel (il s'agit ici de calculs purement géométriques). A partir de ces estimations, on peut appliquer directement la formule EQ A.59 du document annexe.

Dans le cas où la lumière naturelle pénètre dans le local au travers de fenêtres de grande taille distribuées irrégulièrement, le calcul précédent ne s'applique plus. Une autre approximation est toutefois possible en utilisant le rapport de l'éclairage pupillaire sur l'éclairage horizontal (EY/EH). Sur 21 exemples, dont les 16 situations de l'expérience et 5 situations en lumière naturelle, nous avons trouvé une relation (eq. 5.17) entre le facteur d'hétérogénéité et le rapport des éclairages.

$$I \approx 1 - 0.908 \exp\left(-0.135 \ln^2\left(\frac{\pi EY}{EH}\right)\right) \quad (\text{eq. 5.17})$$

Sur la figure présentée ci-dessous, montrant la forme de la relation entre le rapport des éclairagements et le facteur d'hétérogénéité, on observe qu'il existe un rapport optimal entre les deux éclairagements pour lequel l'homogénéité est la meilleure. Ainsi, l'homogénéité diminue avec une augmentation de la différence entre ces deux éclairagements.

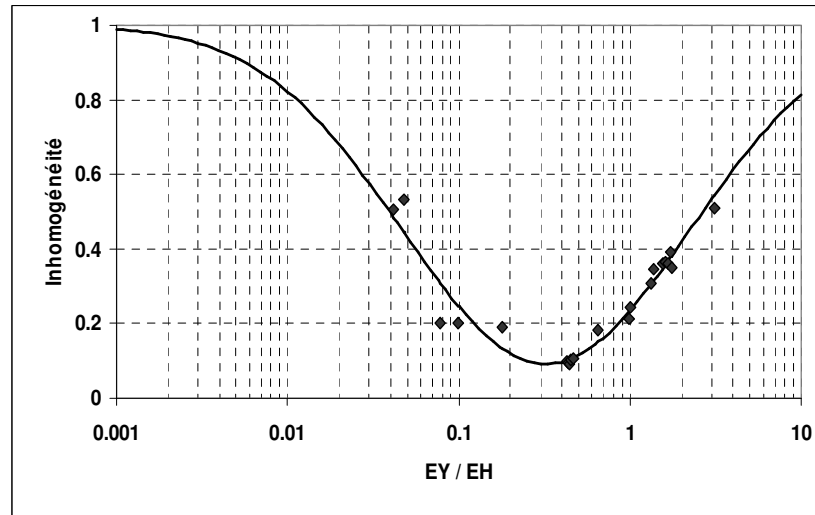


Figure 5.1. Relation entre l'inhomogénéité et le rapport d'éclairage. La courbe représente l'équation approchée 5.15.

Les facteurs d'hétérogénéité mesurés par le photoluminancemètre sont corrélés avec ceux calculés par l'équation 5.15. Cette corrélation vaut 0.963, ce qui permet d'évaluer l'erreur faite avec ce calcul.

Remarque

La photographie réalisée avec le photoluminancemètre doit impérativement se faire avec l'écran éteint, ceci non seulement à cause de sa fréquence de balayage dans le cas d'un écran cathodique, mais surtout parce que l'écran éteint permet la mesure des réflexions diffuses et spéculaires.

Notion d'individu moyen

Nous avons vu que les indicateurs d'inconfort dépendent aussi de l'individu à travers les paramètres physiologiques (L_m , V_m , p et $V1$) mesurables à partir du test C45. Mais en phase de conception de locaux, ces paramètres sont inconnus. On peut alors faire référence à un individu moyen ou mieux, à des valeurs caractéristiques de groupes d'individus représentatifs de la population active, définis par leur âge et leurs défauts visuels. Par exemple, les 1212 tests C45 réalisés sur le terrain ont été définis comme constituant un groupe représentatif de la population des opérateurs sur écran. Les figures 2.12 et 2.13 donnent les distributions du couple (L_m , V_m). On voit que la moyenne de $\ln(L_m)$ vaut 2.26 ce qui veut dire que L_m vaut en moyenne (en utilisant l'équation EQ A.12) 16.5 cd/m^2 et que l'acuité V_m moyenne vaut 10.9 dixièmes.

5.3. Utilisation des indicateurs d'inconfort pour des recommandations

Les indicateurs mis en évidence dépendent de multiples facteurs, ce qui rend difficile l'élaboration de recommandations sous forme d'échelles graduées pour chaque indice ou les facteurs qui les constituent. Il existe toutefois des cas où la valeur que prend un seul de ces facteurs, soit tellement mauvaise que les indices résultants seront mauvais quelles que soient les valeurs des autres facteurs qui entrent en jeu. Il en résulterait cependant en général des fourchettes tellement larges qu'elles en deviendraient inutilisables.

Nous proposons toutefois des abaques (figures 5.2 à 5.6) en faisant quelques simplifications, c'est-à-dire, en fixant les valeurs de certains facteurs, comme par exemple, une température de couleur de 5000 K, un écran de luminance fixée à 100 cd/m², un contraste caractère-écran de 90% et une valeur de 16.5 cd/m² pour la luminance physiologique correspondant à la valeur moyenne de notre population de référence. L'exemple est donné pour l'indice PGG.

Le système de prédiction est constitué de deux abaques, l'un servant à établir la valeur de l'indice d'inconfort et l'autre à estimer les causes principales de l'inconfort.

Ce deuxième abaque contient 3 à 8 zones (cf. graphiques 5.3, 5.5, 5.7 et 5.9) dont les significations sont décrites ci-dessous

Les zones d'inconfort 1 à 8 sont définies comme suit:

zone 1: entourage et écran sombre définis par $PME > 50\%$ et $PMT > 50\%$;

zone 2: entourage sombre et écran correct définis par $PME > 50\%$ et $PMT \& PET < 50\%$;

zone 3: entourage sombre et écran éblouissant définis par $PME > 50\%$ et $PET > 50\%$;

zone 4: entourage correct et écran sombre définis par $PME \& PEE < 50\%$ et $PMT > 50\%$;

zone 5 (en blanc sur les figures): entourage et écran corrects, cette zone est le confort définis par $PME \& PEE < 50\%$ et $PMT \& PET < 50\%$;

zone 6: entourage correct et écran éblouissant définis par $PME \& PEE < 50\%$ et $PET > 50\%$;

zone 7: entourage éblouissant et écran sombre définis par $PEE > 50\%$ et $PMT > 50\%$;

zone 8: entourage éblouissant et écran correct définis par $PEE > 50\%$ et $PMT \& PET < 50\%$;

zone 9: entourage éblouissant et écran éblouissant définis par $PEE > 50\%$ et $PET > 50\%$;

Ces graphiques permettent de savoir comment corriger la situation, lorsque l'évaluation au moyen de l'indice PGG donne un mauvais score.

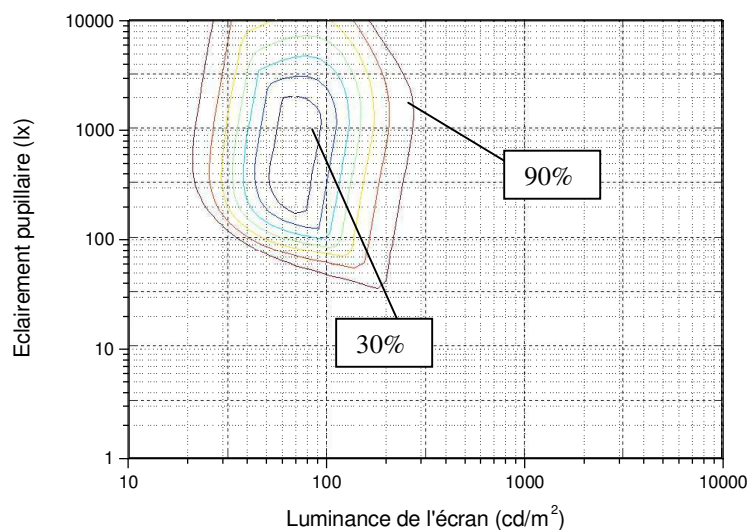


Figure 5.2. Abaqués pour l'indice PGG (éblouissement global) dans l'espace "luminance de l'écran – éclairement pupillaire" avec un facteur d'hétérogénéité fixé à 0.1. Les isovalues correspondent à des pas de 10% variant entre 30% et 90%.

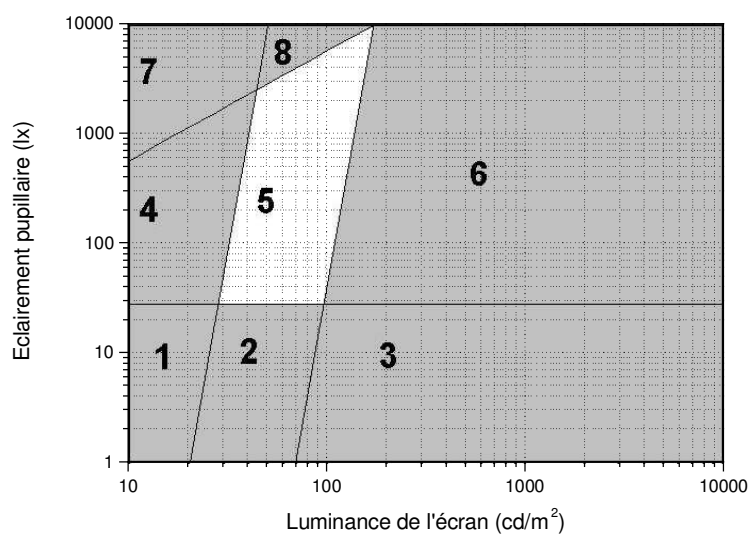


Figure 5.3. Distribution des zones d'inconfort dans l'espace "éclairement pupillaire - luminance d'écran" pour un facteur d'hétérogénéité de 0.1.

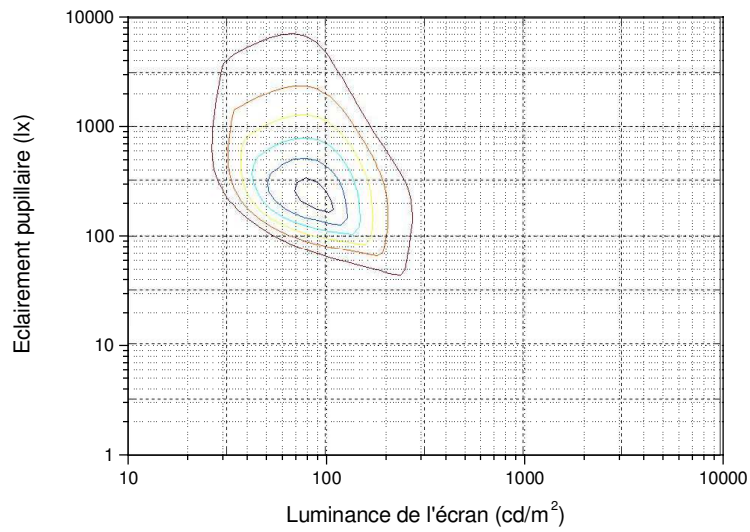


Figure 5.4. Abaques pour PGG (éblouissement global) dans l'espace (luminance de l'écran – éclairement pupillaire), avec un facteur d'hétérogénéité fixé à 0.5. Les isovalues correspondent à des pas de 10 % variant entre 40% et 90%.

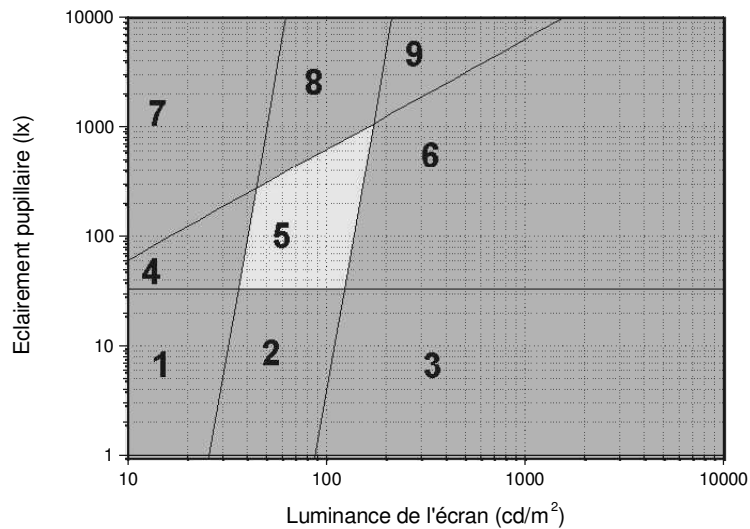


Figure 5.5. Distribution des zones d'inconfort dans l'espace "éclairement pupillaire – luminance d'écran" pour un facteur d'hétérogénéité de 0.5.

Ces abaques montrent que pour une même valeur d'indice, une augmentation de l'hétérogénéité doit être compensée par une baisse de l'éclairement pupillaire.

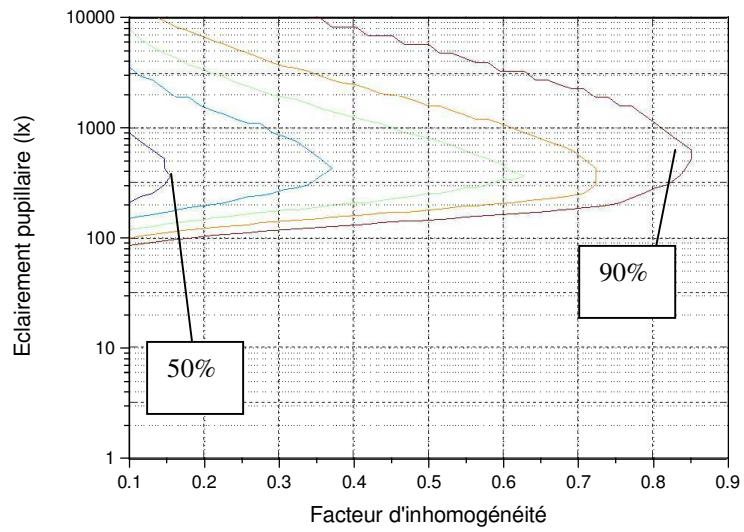


Figure 5.6. Abaques pour l'indice d'éblouissement global PGG dans l'espace "hétérogénéité – éclairage pupillaire" pour une luminance de l'écran fixée à 40 cd/m^2 . Les isovaleurs correspondent à des pas de 10 % variant entre 50% et 90%.

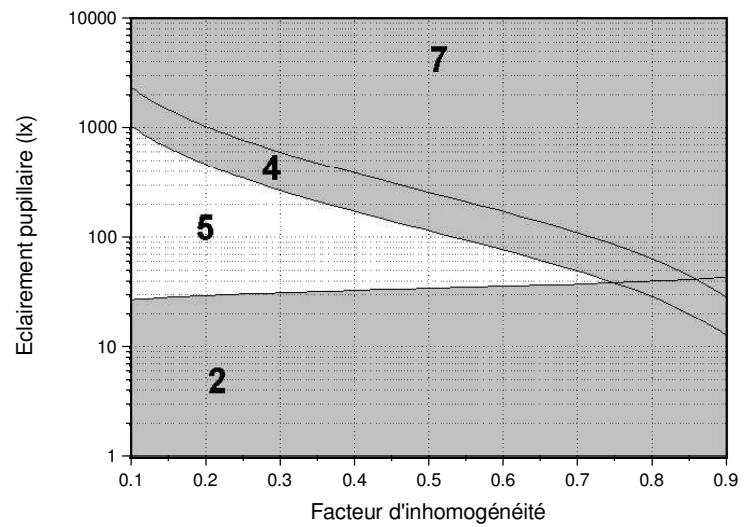


Figure 5.7. Distribution des zones d'inconfort dans l'espace "éclairage pupillaire – facteur d'hétérogénéité" pour une luminance d'écran de 40 cd/m^2 .

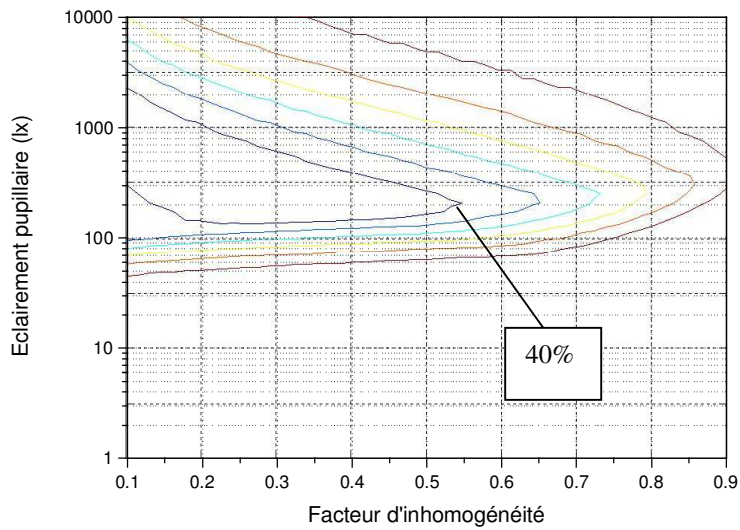


Figure 5.8 Abaques pour l'indice d'éblouissement global PGG dans l'espace "hétérogénéité – éclairage pupillaire" pour une luminance de l'écran fixée à 100 cd/m^2 . Les isovaleurs correspondent à des pas de 10 % variant entre 40% et 90%.

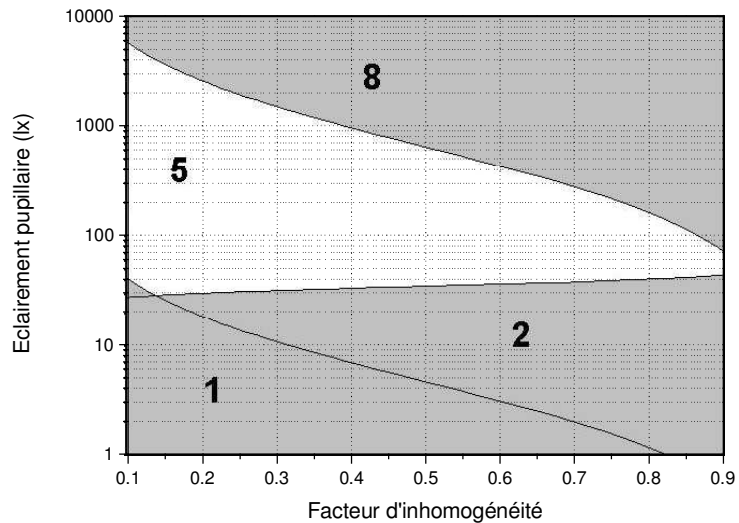


Figure 5.9. Distribution des zones d'inconfort dans l'espace "éclairage pupillaire – facteur d'hétérogénéité" pour une luminance d'écran de 100 cd/m^2 .

Lorsque l'on garde constante la luminance de l'écran et que l'on fait varier le facteur d'hétérogénéité et l'éclairage pupillaire, comme pour les figures 5.4 et 5.5, la probabilité de gêne globale (PGG) prend une valeur minimale (correspondant donc à un optimum) qui dépend de cette luminance de l'écran. La figure 5.10 montre qu'il existe une luminance (environ 80 cd/m^2) telle que l'indice PGG est minimum (environ 25%). On voit que si l'on a une luminance de 10 ou de 1000 cd/m^2 , l'indice PGG se trouve à 100%. De cette courbe on peut tirer une fourchette raisonnable pour le choix d'une luminance optimum de l'écran. En effet, si on donne comme critère d'avoir un indice PGG d'au moins 50%, la luminance de l'écran devra se situer entre environ 40 et 125 cd/m^2 . En dehors de cette fourchette,

l'indice PGG ne sera jamais au dessous de 50% quelles que soient les valeurs des autres paramètres).

On peut aussi donner une fourchette d'éclairement pupillaire pour une luminance d'écran de 100 cd/m^2 (luminance classique d'un écran à tube cathodique normal), à partir de la figure 5.10. Pour un critère de 50% de probabilité et un faible manque d'homogénéité (0.1), on voit que l'éclairement pupillaire doit se situer entre environ 100 et 400 lx.

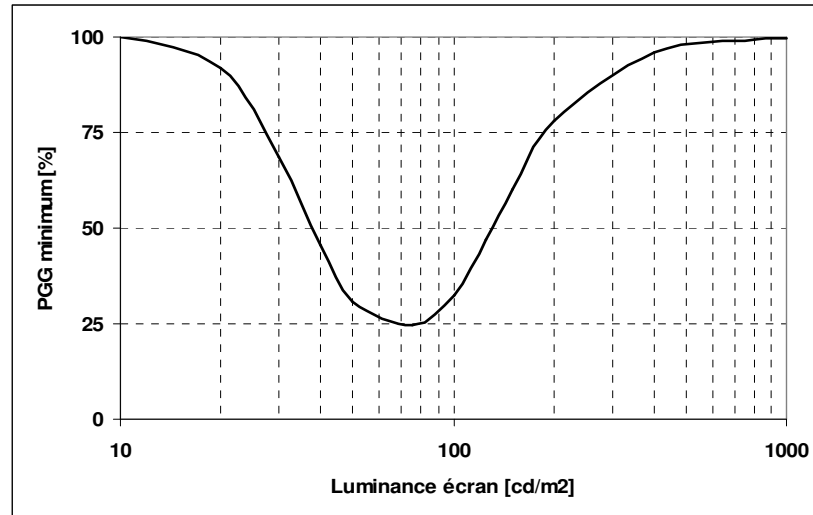


Figure 5.10. PGG minimum en fonction de la luminance de l'écran.

En ce qui concerne l'éclairement horizontal, on peut déduire de l'équation 5.15 reliant le facteur d'hétérogénéité aux éclairagements pupillaires (EY) et horizontaux (EH), que si $EH = \pi EY$, l'hétérogénéité est alors minimale (autour de 0.1), donc également la gêne. On peut donc déduire une autre fourchette pour l'éclairement horizontal, en reprenant la fourchette qu'on a donné pour l'éclairement pupillaire ([100-400] lx) : il faudra un éclairage horizontal compris entre environ 314 et 1260 lx.

On note aussi, d'après le graphique 5.6, que la probabilité de gêne en terme d'indice PGG descend difficilement au dessous de 25%. On peut donc admettre pour cet indice les échelles d'acceptation suivantes:

$PGG \leq 37.5$	Bon
$37.5 < PGG \leq 50$	Moyen acceptable
$50 < PGG \leq 75$	Médiocre
$PGG > 75$	Mauvais

Tableau 5.1. Echelles d'acceptation pour l'indice d'inconfort global PGG

5.4. Quelques exemples provenant du terrain

Afin d'illustrer l'application des indices proposés, nous présentons ici trois exemples de terrain, où le recueil des données photométriques s'est fait au moyen du photoluminancemètre numérique et d'un luxmètre. Rappelons que les photographies sont toujours faites avec l'écran éteint (voir paragraphe 5.4). Les indices d'inconfort ont été calculés pour un écran de luminance courante fixée à 100 cd/m².

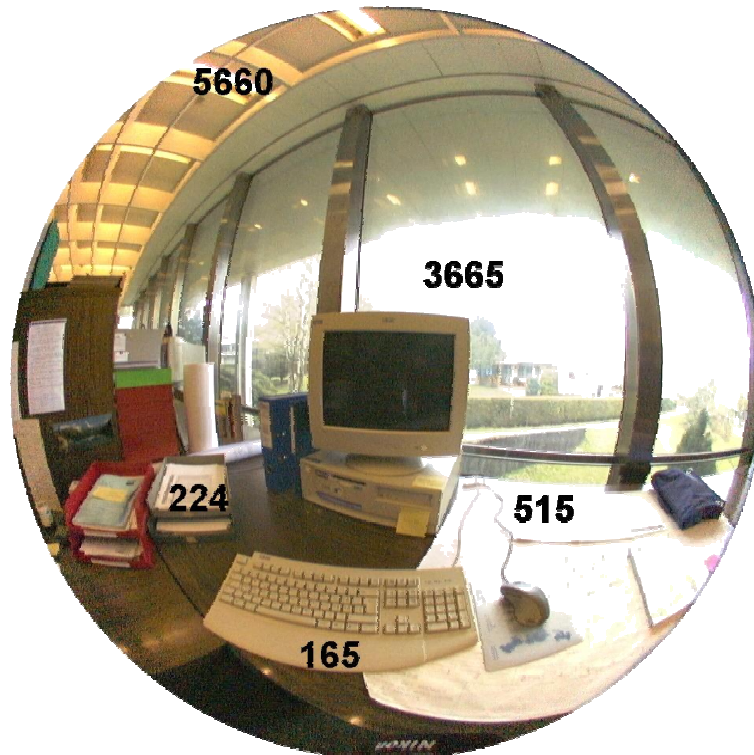


Figure 5.11. Photographie fish-eye, avec quelques valeurs de luminance, de l'exemple n°1. L'éclairage horizontal valait 837 lx, l'éclairage vertical 1095 lx, et le facteur d'hétérogénéité 0.357.

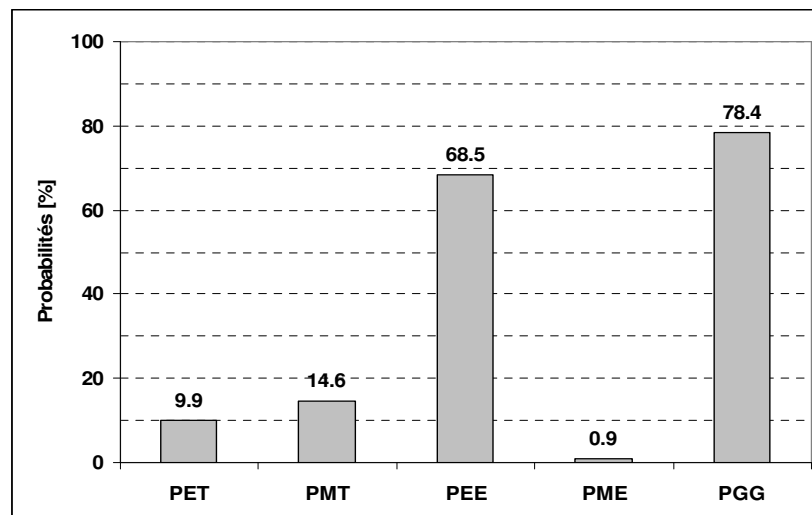


Figure 5.12. Calcul des 5 indices d'inconfort visual pour l'exemple n°1 (luminance de l'écran =100 cd/m²). PET (tâche claire), PMT (tâche sombre), PEE (entourage éblouissant), PME (entourage sombre) et PGG (gêne globale).

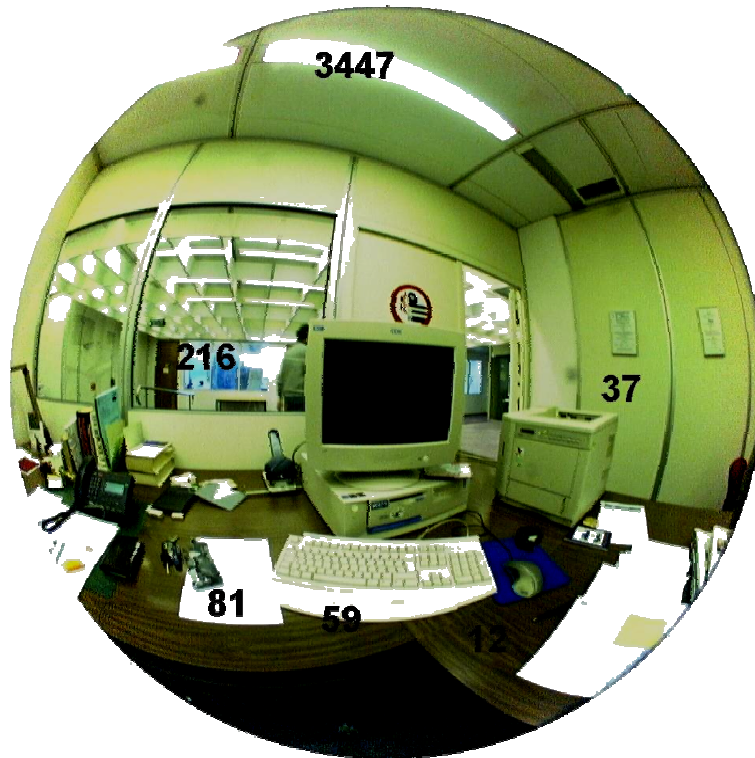


Figure 5.13. Photographie fish-eye, avec quelques valeurs de luminance, de l'exemple n°2. L'éclairage horizontal valait 409 lx, l'éclairage vertical 157 lx et le facteur d'hétérogénéité 0.255.

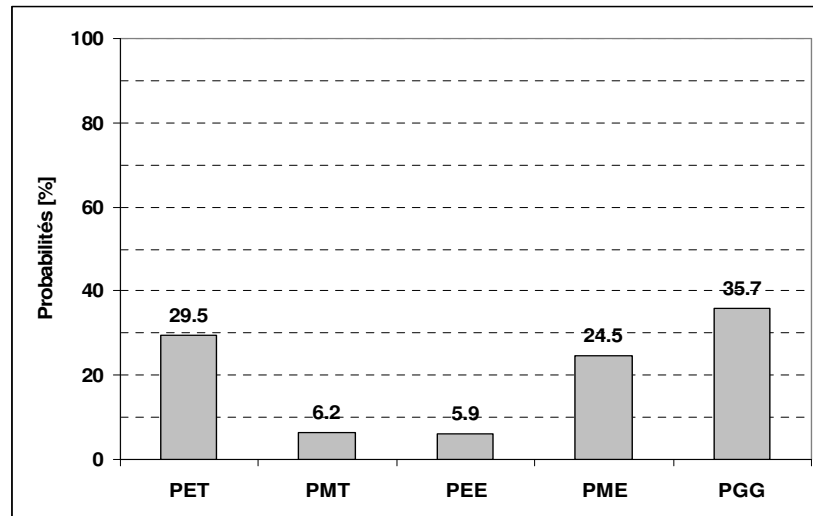


Figure 5.14 Calcul des 5 indices d'inconfort visuel pour l'exemple n°2 (luminance de l'écran =100 cd/m²). PET (tâche claire), PMT (tâche sombre), PEE (entourage éblouissant), PME (entourage sombre) et PGG (gêne globale).

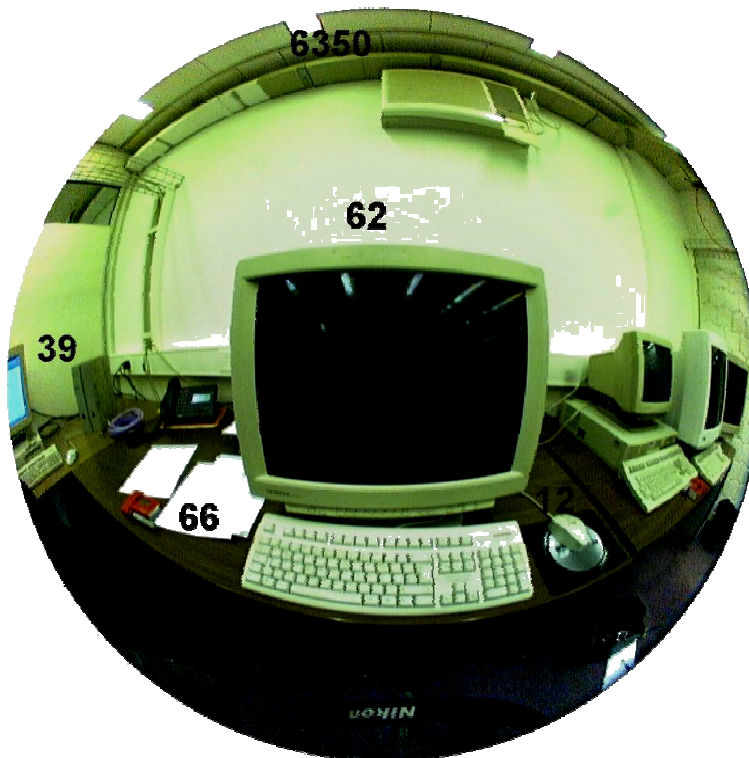


Figure 5.15. Photographie fish-eye, avec quelques valeurs de luminance, de l'exemple n°3. L'éclairage horizontal valait 382 lx, l'éclairage vertical valait 86 lx et le facteur d'hétérogénéité valait 0.153.

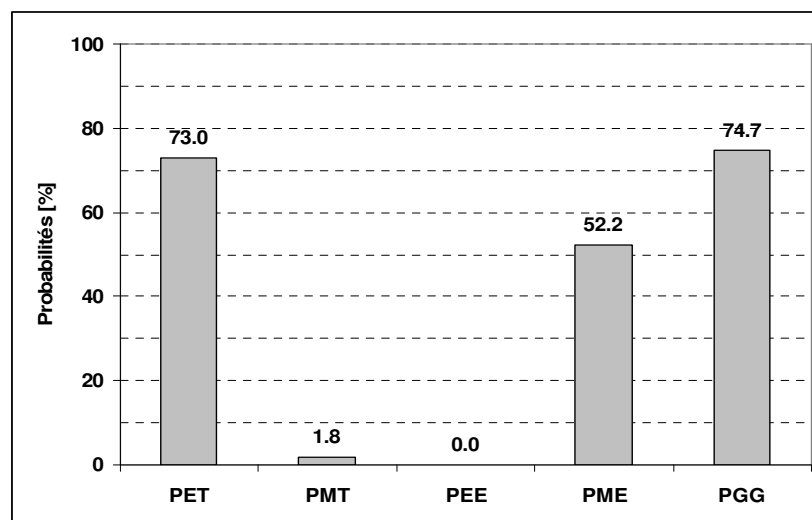


Figure 5.16. Calcul des 5 indices d'inconfort visuel pour l'exemple n°3 (luminance de l'écran =100 cd/m²). PET (tâche claire), PMT (tâche sombre), PEE (entourage éblouissant), PME (entourage sombre) et PGG (gêne globale).

Si on regarde l'indice PGG de gêne globale, on observe que les exemples 1 et 3 peuvent être considérés comme mauvais (PGG exemple 1: 78.4%, exemple 2: 74.7%). En comparant la figure 5.16 avec la figure 5.12, on voit que les autres indicateurs présentent des distributions différentes. Ainsi, pour l'exemple 1, la cause principale de l'inconfort est l'entourage qui est éblouissant (PEE = 68.5%). L'image (5.7) montre en effet que l'écran est placé face aux fenêtres qui sont très lumineuses (>3000 cd/m²). En ce qui concerne l'exemple n°3, la cause principale de la gêne est l'éblouissement dû à la tâche (PET = 73%) associé à un sentiment de manque de lumière (PME=52.2%) provenant de

l'entourage. Comme le montre la photo (Fig. 5.11), nous sommes en situation d'un éclairage artificiel faible, créant ainsi un fort contraste avec l'écran allumé (fixé rappelons-le à 100 cd/m^2).

L'exemple n°2 présente un PGG plutôt bon ($35.7\% < 37.5$), on voit que tous les indices sont bons, l'écran est toutefois légèrement éblouissant ($\text{PET}=29.5\%$). La photographie (Fig. 5.9) montre que l'entourage est relativement homogène, les lampes au plafond ne sont pas extrêmement lumineuses (3447 cd/m^2) et, surtout, elles sont loin de l'axe de vision.

Les indicateurs permettent donc de bien caractériser la situation, ce qui les rend utiles pour l'ergonome et l'ingénieur qui cherchent à les corriger.

5.5. Fatigue visuelle

Pour clore ce chapitre, il faut revenir sur l'expérience de suivis. Cette expérience a permis de faire une relation entre signes d'asthénopie et dose de mauvaises conditions. La dose est définie comme une durée pendant laquelle l'éclairement est en dehors d'une certaine fourchette. On peut penser que cette fourchette correspond aux limites entre bonnes et mauvaises conditions lumineuse caractérisées par de mauvais indicateurs. Cette hypothèse n'était pas vérifiable pendant l'expérience, car il n'est pour l'heure actuelle pas possible d'évaluer ces indicateurs en temps réel. Nous avons relevé pour les deux sujets de l'expérience la même relation mais avec des valeurs différentes. Cela suggère que ces paramètres dépendent de l'individu pour diverses raisons. On peut émettre les hypothèses suivantes pour expliquer cela:

- Les deux sujets n'avaient pas le même profil visuel
- Les activités des deux sujets génèrent des charges mentales différentes. En effet, le premier était chercheur et s'occupait essentiellement de programmation, tâche difficile mais motivante; le deuxième réalisait essentiellement du dessin de plans, tâche mentale plus facile mais beaucoup plus monotone et présentant ces propres exigences visuelles.
- Les environnements organisationnels des deux sujets étaient différents. Le premier avait une grande liberté, notamment au niveau des horaires, ce qui n'était pas le cas pour le deuxième sujet. étant lui dans un situation avec risque de stress susceptible d'entraîner une fatigue oculaire.
- Les environnements lumineux étaient globalement différents.

Cette expérience devrait donc être approfondie afin de pouvoir évaluer ces coefficients dans une approche plurifactorielle. En particulier, il faudrait utiliser les questionnaires ad hoc et mesurer, comme dans d'autres études déjà citées, les variations de la puissance d'accommodation et de convergence afin d'évaluer les composantes musculaires de la fatigue. Finalement il s'agit de mieux connaître la contribution des composantes lumineuses dans de la relation dose – effet qui impliquent tout un ensemble de facteurs dont le climat du local , le bruit etc.

CHAPITRE VI

CONCLUSIONS

Notre recherche a permis de mettre en évidence quatre indices de confort visuel (PMT, PET, PEE et PMP). Les indices PMT, PET et PEE se rapportent à l'éblouissement d'inconfort (Discomfort Glare), alors que l'indice PMP se rapporte à l'éblouissement dit perturbateur ou physiologique (Disability Glare).

Pour l'ergonome, ces indices sont susceptibles d'être utilisés de deux manières : d'une part, pour qualifier des situations lumineuses sur le terrain et, d'autre part, pour fournir aux concepteurs des critères d'évaluation des situations proposées. Contrairement aux indicateurs et recommandations existants, ces indices sont nuancés, avec une échelle d'intensité simple (probabilité allant de 0 à 100%). En effet, ces indices prennent en compte le profil visuel des sujets (variables physiologiques) et la sollicitation lumineuse réelle (variables photométriques) dont ils sont l'objet à un moment donné dans un local donné. En ce qui concerne les paramètres photométriques, ce sont la distribution de luminances dans le champ visuel et l'éclairement pris au niveau des yeux qui interviennent, l'éclairement horizontal ne jouant lui qu'un rôle indirect.

En ce qui concerne l'acuité, le modèle basé sur la MTF (fonction de transfert de la modulation) semble expliquer correctement le phénomène. Cette fonction, bien connue des psychophysiciens et à la base de certains tests cliniques, ouvre une voie pour mieux comprendre le mécanisme qui régit l'acuité visuelle en situation réelle.

Alors que notre expérience ne permettait pas de montrer une relation directe entre signes d'asthénopie et mauvaises conditions lumineuses, elle a, par contre, montré une relation directe entre signes d'inconfort et perte de performance. On peut ainsi raisonnablement admettre qu'avec l'effet de la durée, de l'intensité du travail et un mauvais profil visuel, de mauvaises conditions lumineuses accélèrent l'apparition des signes d'asthénopie. Des analyses factorielles citées aux chapitres I et II ont montré que les signes d'asthénopie (fatigue, douleurs oculaires et signes visuels associés) avaient tendance à masquer les signes de gêne. Nous avons également montré qu'il importait de poser des questions précises en relation avec une situation donnée. Mais surtout, il manquait alors les indicateurs photométriques susceptibles d'établir cette relation entre gêne et conditions lumineuses. Cependant Mr. Meyer avait mis en évidence dès sa première analyse du travail sur écran que ce poste de travail comportait des conditions lumineuses s'éloignant des conditions généralement favorables du travail de bureau avec documents papier. Notre expérience de suivi, bien que nécessitant un approfondissement, a suggéré, pour un temps très court de suivi, une certaine notion de dose de "mauvaises conditions lumineuses" définie comme le temps durant la journée pendant lequel les conditions lumineuses sont mauvaises. Ceci avait également été montré par Mr. Meyer pour les postes à forte charge visuelle, soit les horlogers travaillant avec binoculaire, des postes sur tables lumineuses et des postes à écran. Il est évident que la fatigue dépend aussi de l'activité de l'individu et de la charge mentale qu'elle implique. Cette partie de la recherche permet donc de faire un lien entre composantes mentale de l'astreinte liée à l'exploration visuelle du sujet et conditions lumineuses. Alors que l'effet de la nature de la tâche et sa charge mentale a donné lieu à de nombreux travaux en ergonomie, il n'a pas été suffisamment tenu compte, de la contribution de mauvaises conditions lumineuses, ceci faute d'indicateurs pertinents.

Alors qu'il s'agissait principalement de concevoir des indicateurs d'inconfort en relation avec de mauvaises conditions lumineuses, nous avons été amené au cours de cette étude à développer plusieurs outils susceptibles d'intéresser les ergonomes et les médecins du travail.

Tout d'abord il s'agit de tests susceptibles de rendre compte de la relation entre acuité et sensibilité à la lumière. En effet cette étude avait bien été motivée par un premier test d'acuité développé par Meyer et al., simulant mieux que les tables d'acuité courante, la sollicitation des yeux lors du travail sur écran (réf. [62], [65]). Reconsidérant

fondamentalement la problématique de l'acuité et de sa relation avec le contraste de luminance, nous avons été amené à développer de nouveaux tests visuels susceptibles d'intéresser les médecins du travail. Ainsi, le test visuel sur écran a démontré son efficacité dans l'estimation de l'acuité. De même que les tests sur la table lumineuse sont extrêmement précis en terme d'acuité (jusqu'à 20 dixièmes, pour 60 cm de distance). D'autre part, ces derniers comportent aussi une grande dynamique de luminance (possibilité de régler la luminance jusqu'à 8000 cd/m²).

Actuellement, un nouvel outil de test visuel est en cours de finalisation. Cet outil, appelé Ergovisiomètre, correspond à une nouvelle version modernisée du test de référence C45 utilisé dans cette étude. Il devrait permettre de mesurer l'acuité visuelle en fonction de la luminance du caractère en corrigeant certaines limitations dues au concept technique du test le C45:

- La luminance du C45 ne dépassait pas 100 cd/m². L'Ergovisiomètre permettra de monter jusqu'à 5000 cd/m², on peut dès lors envisager de reproduire des courbes acuité – luminance du caractère en contraste inversé telles que celles de la figure 4.76 et approfondir le modèle tiré de la MTF.
- Le C45 ne permettait pas de présenter des acuités plus grandes que 15 dixièmes, ce qui provoque une accumulation de sujets à cette valeur. L'Ergovisiomètre permettra de présenter des acuités jusqu'à 20 dixièmes pour 60 cm de distance.
- Contrairement au C45, l'Ergovisiomètre sera entièrement géré par l'informatique, facilitant ainsi l'enregistrement et l'utilisation des données.

Pour rendre compte des paramètres photométriques du modèle nous avons développé, un photoluminancemètre numérique sous la forme d'un logiciel d'analyse de la photo digitalisée d'une caméra fisheye (cf. § 3.6.5) qui permet de mesurer les ambiances lumineuses avec une précision suffisante pour déterminer le degré de confort visuel. Bien que, a priori, non indispensable, la camera fish-eye permet tout d'abord de donner très rapidement une image du champ visuel en coordonnées polaires. On peut alors procéder de deux manières pour rendre compte de la répartition des luminances dans le champ: soit mesurer les principales valeur de luminance au moyen d'un luminancemètre, soit directement utiliser la photo digitalisée.

En conclusion, nous estimons avoir apporté une contribution importante à l'ergonomie visuelle en développant sur la base de la démarche ergonomique les indicateurs photométriques et spatiaux (métriques) ainsi que leurs correspondants physiologiques en terme de réponses subjectives et objectives, nécessaires pour pouvoir optimiser les conditions lumineuses. Il s'agit non seulement du concept mais également des outils d'application nécessaires à la pratique de l'ergonomie. Ces indicateurs visuels déterminant fondamentalement la réponse spécifique de l'organe visuel, à savoir une visibilité suffisante, notre étude sur l'inconfort a nécessairement débouché sur l'étude approfondie de la relation entre la performance d'acuité et la sensibilité à la lumière, ceci dans des conditions qui correspondent à la sollicitation réelle au poste de travail. Ayant mentionné cette nécessité pour l'ergonomie de passer du terrain au laboratoire et réciproquement, nous pouvons espérer que ces nouveaux indicateurs seront appliqués non seulement dans le but de les valider sur le terrain, mais surtout celui d'améliorer les aménagements des conditions lumineuses dès leur conception.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Adrian, W. K.** Visual performance, Acuity and Age, In: *Lux Europa conference proceedings*. Edimbourg: 1993, p. 278-290.
2. **Adrian W. K., Gibbons R.** Visual performance and its metric. *Ligth & Engineering 2* , N°3:1-34, 1994.
3. **AFE.** *Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail*. Zürich: AFE, 1965.
4. **AFNOR.** *Tome II, ergonomie*. 5 ed. Paris: AFNOR, 1999, (NFX 35 2121)
5. **Bradeley R. D., Logan H. L.** A Uniform Method for Computing the Probability of Comfort Response in a Visual Field. *Illuminating Engineering society*, 1964.
6. **Cen.** Termes de base et critères pour la spécification des exigences en éclairage, In: *Lumière et éclairage*, edited by norme européenne. Bruxelles: 2001, p. prEN 12665).
7. **Chauvel P., Collins J. B., Dogniaux R., and Longemore J.** Glare from windows: current views of the problem. *Ligthning Research & Technologie 14* N°1, 1982.
8. **CIE.** *Vocabulaire international de l'éclairage*. 2ème ed. 1989, (Publications CIE, N° 17.4).
9. **CNA.** *Le travail à l'écran de visualisation*. Lucerne: CNA, 2002, (Référence, 44022.f).
10. **Compagnon, R.** *Simulations numériques de systèmes d'éclairage naturel à pénétration latérale*. Lausanne: EPFL LESO-PB, 1995, (Thèse).
11. **Compagnon, R.** "The JINDEX" visual discomfort analysis program as part of the radiance pictures simulation procdss (Swiss contribution to the Daylight Europe research). Lausanne: EPFL LESO-PB, 1995.
12. **Courret G., Scartezzini J. L., Francioli D., and Meyer J. J.** Design and assessment of an anidolic light-duct. *Energy and Building 28*:79-99, 1998.
13. **Courret, G., Francioli, D., Scartezzini, J. L., and Meyer, J.-J.** Anidolic ceiling: a new light-duct for side-daylighting in buildings, In: *International Daylighting Conference '98 Proceedings*. Ottawa: 1998, p. 189-197.
14. **CSE.** *Recommandations générales pour l'éclairage*. CSE, 1965, (ASE 4014)
15. **Davis R. G., Ginthner D. N.** Correlated color temperature, illuminance level, and the Kruithof Curve. *Illuminating Engineering society*:27-38, 1990.
16. **Déribéré, M.** *La couleur dans les activités humaines*. 3 ed. Paris: Dunod, 1968.
17. **Dilaura D. L.** On the computation of visual comfort probability. *Illuminating Engineering society*, 1976.
18. **Dorard, G.** *Place et validité des tests ophtalmologiques dans l'étude de la fatigue visuelle engendrée par le travail sur écran*. Grenoble: Université technique médicale, 1988, (Thèse)
19. **Einhorn H. D.** A new method for the assessment of discomfort glare. *Ligthning Research & Technologie 1*(4), 1969.
20. **Einhorn H. D.** Discomfort Glare: a formula to bridge differences. *Ligthning Research & Technologie 11*(2), 1979.

21. **Escofier, B. and Pagès, J.** *Analyses factorielles simples et multiples, objectifs, méthodes et interprétation*. 3ème ed. Paris: Dunod, 1998.
22. **Fanger, P. O.** *Thermal comfort*. New York: Mc Graw-Hill- book Company, 1973.
23. **Fischer, D.** *Erfolgreiche Arbeit des CIE-Komitees "Discomfort Glare"*. LICHT, 1990.
24. **Flynn J. E., Clyde E. H., Terry S., and Osyp M.** A guide to methodology procedures for measuring subjective impressions in lighting. *Journal of IES*, 1979.
25. **Fontoyont, M., Avouac-Bastie, P., and Dumortier, D.** Suivi d'une opération de rénovation de l'éclairage de 20 salles de classe en région Rhône-Alpes, France, In: *Lux Conference Proceedings Lux Europa Edimbourg*. Edimbourg: 1993, p. 907-915.
26. **Francioli D., Meyer J. J.** L'indice d'inconfort "J" du LEV: nouveaux outils d'application et création d'une banque de données. *Sciences de la vision et leurs applications (Paris)* 6(1):12-24, 1997.
27. **Francioli, D., Meyer, J. J., and Kerkhoven, H.** New light measuring methods for the determination of the discomfort index "J" and the set-up of a data bank, In: *Lux Europa 1997: the 8th European Lighting Conference, Amsterdam, 11-14 May 1997*. Arnhem: Office NSVV, 1997, p. 663-675.
28. **Francioli, D., Meyer, J. J., and Kerkhoven, H.** Méthode PIECLE pour l'évaluation du confort visuel dans un local, In: *Energie solaire et bâtiment, CISBAT'99: Conférence internationale Energie Solaire et Bâtiment, Lausanne, 22-23 septembre 1999*. Lausanne: EPFL LESO-PB, 1999, p. 271-276.
29. **Francioli, D., Meyer, J. J., Michel, L., and Kerkhoven, H.** New global indexes for visual comfort, In: *International Lighting Congress, Istanbul 2001, 12-14 September*, edited by Uenver, R., Oeztörk, L. D., and Yener, A. K. Istanbul: Yildiz Technical University Printhouse, 2001, p. 271-278.
30. **Francioli, D., Meyer, J. J., Michel, L., and Kerkhoven, H.** Test visuel sur écran pour optimiser les conditions lumineuses, In: *Les transformations du travail, enjeux pour l'ergonomie : XXXVIème congrès annuel SELF, 32e congrès ACE, Montréal, 3.4.5 octobre 2001 : recueil des résumés : cédérom des actes*. Montréal: 2001, p. 311-315.
31. **Frieling, H.** *Psychologische Raumbestaltung und Farbdynamik*. 5 ed. Gottingen: Musterschmidt Verlag, 1963.
32. **Fry G.** A Simplified Formula for Discomfort Glare. *Journal of IES*, 1976.
33. **Gaudart L., Crebassa J., and Petrakian J. P.** La transformée par ondelette intérêt et application aux fonctions de sensibilité au contraste. *Sciences de la vision et leurs applications (Paris)* 3(1):18-24, 1994.
34. **Golay, Y.** *Etudes typologiques, programme interdisciplinaire LUMEN "Lumière naturelle et énergétique du bâtiment"*. Lausanne : EPFL LESO ; Genève: Uni de Genève UMTE, 1994.
35. **Goodbari I.** A Simplified Method for determining the acceptability of a luminaire from the VCP standpoint. *Journal of IES*, 1976.
36. **Grandjean, E.** *Précis d'ergonomie*. Paris: Edition d'organisation, 1983.
37. **Grandjean, E.** *Ergonomics in Computerized Offices*. London: Taylor & Francis, 1988.
38. **Gremy, F. and Perrin, J.** *Eléments de biophysique*. Paris: Flammarion Médecine-sciences, 1971, N°2).

39. **Guirao A., Artal P.** Vieillesse et qualité d'image de l'œil. *Sciences de la vision et leurs applications (Paris)* 7(1):35-39, 1998.
40. **Guth S. K., Mc Nelis J. F.** A Discomfort Glare Evaluator. *Illuminating Engineering society*, 1959.
41. **Guth S. K., Mc Nelis J. F.** Discomfort Glare from Multiple Sources. *Illuminating Engineering society*, 1961.
42. **Guth S. K.** A Method for the Evaluation of Discomfort Glare. *Illuminating Engineering society*, 1963.
43. **Guth S. K.** Computing Visual Comfort Ratings For a Specific Interior Lighting Installation. *Illuminating Engineering society*, 1966.
44. **Hoffmann, A., Menozzi, M., and Krueger, H.** A PC-based System for Medical Screening, In: *Advances in Occupational Ergonomics and Safety I: Proceedings of the XIth Annual International Occupational Ergonomics and Safety Conference held in Zurich, Switzerland, 8-11 July 1996, Vol. 1*, edited by Mital, A. Cincinnati: International Society for Occupational Ergonomics and Safety, 1996, p. 221-226.
45. **Hoffmann A., Menozzi M.** Computer-basierte Prüfung der Sehschärfe-Technische Realisierung. *Biomedical Technik* 42, 1997.
46. **Hopkinson R. G.** Evaluation of Glare. *Illuminating Engineering society*, 1957.
47. **ISO.** *Principes d'ergonomie visuelle - l'éclairage des systèmes de travail intérieurs*. ISO, 1989, (Norme 8995).
48. **ISO.** *Measure thermal environment, Tables pour détermination du vote moyen prévisible PMV à une humidité relative de 50%*. ISO, 1994, (Norme 7730).
49. **Kruithof A. A.** Tubular luminescence lamps for general illumination. *Philips technical review* N°3:65-96, 1941.
50. **Laville, A.** *L'ergonomie*. 6ème ed. Paris: PUF, 1998, (Que sais-je N°1626).
51. **Läubli T., Hünting W., and Grandjean E.** Postural and visual loads at VDT workplaces, Part 2: lighting conditions and visual impairments. *Ergonomics* 24:933-944, 1981.
52. **Lebart, L., Morineau, A., Lambert, T., and Pleuvret, P.** *SPAD version 3, Système pour l'analyse des données*. Saint-Mandé: Centre international de statistique et d'informatique appliquée, 1998.
53. **Legrand, Y.** *L'espace visuel*. 3ème ed. Paris: Masson, 1956, (optique physiologique, Tome III).
54. **Levin R. E.** Position Index in VCP Calculations. *Journal of IES*, 1975.
55. **Luckiesh M., Guth S. K.** Brightnesses in visual Field at Borderline Between Comfort and Discomfort (BCD). *Illuminating Engineering society*, 1949.
56. **Lythgoe, R. J.** *The measurement of visual acuity*. London: H. M. Stationery Office, 1932, (N°173).
57. **Menozzi, M.** *Sehen und Bildschirm*. Zürich: ETH, 1989, (Thèse n°9042).
58. **Menozzi M., Buol A. V., Krueger H., and Miège C.** Direction of gaze and comfort: discovering the relation for the ergonomic optimization of visual task. *Ophthalmological physiology* 14:393-399, 1994.

59. **Menozzi, M.** *Sehbeschwerden am Arbeitsplatz*. Zürich: ETH, 1998, (Habil.).
60. **Meyer J.-J., Gramoni R., Korol S., and Rey P.** Quelques aspects de la charge visuelle aux postes de travail impliquant un écran de visualisation. *Le travail humain* 42:275-301, 1979.
61. **Meyer J.-J.** L'évaluation de la charge visuelle et des risques pour la vue lors de l'utilisation intensive d'un microscope binoculaire. *ANACT*:22-49, 1981.
62. **Meyer J.-J., Rey P., Bousquet A., and Pittard J.** Contribution à l'étude de la charge visuelle aux postes de travail avec écran de visualisation. *Klin.Mbl.Augenheilk*:373-376, 1982.
63. **Meyer, J.-J.** L'ergonome doit-il se préoccuper du développement de l'ergophtalmologie, In: *Modalités d'intervention ergonomique en milieu de travail. XXIème congrès, 1-3 octobre 1984*. Genève: cahiers ECOTRA, 1984.
64. **Meyer, J.-J., Bousquet, A., Rey, P., and Pittard, J.** Two new visual tests to define the visual requirements of VDU operators, In: *Ergonomics and health in modern offices; proceedings of the International Scientific Conference on Ergonomic and Health Aspects in Modern Offices, held in Turin, 7-9 November 1983*, edited by Grandjean, E. London: Taylor and Francis, 1984, p. 423-430.
65. **Meyer, J.-J., Rey, P., Schira, J. C., and Bousquet, A.** Sensitivity to light and visual strain in VDT operators : basic data for the design of work stations, In: *Work with display units 86*, edited by Knave, B., Widebaeck, P. G. Amsterdam: Elsevier, 1987, p. 485-489.
66. **Meyer, J.-J., Bousquet, A., Schira, J. C., Zoganas, L., and Rey, P.** Light sensitivity and visual strain when driving at night, In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Vision in Vehicles. Nottingham, U.K., 14-17 Sept. 1987*, edited by Gale, A. G., Freeman, M. H., Haslegrave, C. M., Smith, P., and Terry, S. Amsterdam: Vision in vehicles, 1988, p. 65-71.
67. **Meyer, J.-J., Bousquet, A., Zoganas, L., and Schira, J. C.** Discomfort and Disability Glare in VDT Operators, In: *Proceedings Work With Display Units 99*, edited by Berlinguet, L., Berthelette, D. Amsterdam: Elsevier, 1990.
68. **Meyer, J. J., Francioli, D., Rey, P., and Benoit, F.** Visual discomfort: evaluation after introducing modulated light equipment, In: *Right Light: 2nd European Conference on Energy-Efficiency Lighting, 26-29 September 1993, Arnhem, the Netherlands*. Arnhem: Office NSVV, 1993, p. 348-357.
69. **Meyer, J. J., Francioli, D., and Rey, P.** Observed variation of lighting conditions versus feelings of visual discomfort in VDT operators: application of a new model, In: *Lux Europa 1993: the VIIth European Lighting Conference, 4-7 April 1993, Heriot-Watt University, Edinburgh, Vol 1*. London: CIBSE, 1993, p. 332-339.
70. **Meyer, J. J., Francioli, D., Rey, P., Deschamps, L., and Compagnon, R.** Le nouvel indice d'inconfort visuel du LEV appliqué à l'aménagement des locaux avec écran d'ordinateur: évaluation à partir de données photométriques et de données calculées sur ordinateur, In: *Ergonomie et ingénierie: XXIXème congrès de la Société d'ergonomie de langue française, Vol. 1*. Paris: Ed. Eyrolles, 1994, p. 160-167.
71. **Meyer, J. J., Francioli, D., and Kerkhoven, H.** A new model for the assessment of visual comfort at vdt-workstations, In: *Advances in Occupational Ergonomics and Safety I: Proceedings of the XIth Annual International Occupational Ergonomics and Safety Conference held in Zurich, Switzerland, 8-11 July 1996, Vol. 1*, edited by Mital, A. Cincinnati: International Society for Occupational Ergonomics and Safety, 1996, p. 233-238.
72. **Meyer J. J., Francioli D.** Signification ergonomique et ergophtalmologique du nouvel indice J d'inconfort. *Sciences de la vision et leurs applications (Paris)* 5(1):59-73, 1996.

73. **Meyer, J. J., Bousquet, A., and Rey, P.** Visual performance in night and dusk conditions: results of questionnaires and laboratory tests on 517 drivers, from 16 to 84 years of age, In: *Aging and Human Factors: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Annual Meeting in Soesterberg, November 1993*, edited by Broodhuis, K. Groningen: University of Groningen, Traffic Research Centre, 1996, p. 77-86.
74. **Meyer, J. J.** Aménagement ergonomique des conditions lumineuses, 16-781-A-40. In: *Encyclopédie médico-chirurgicale*. Paris: Elsevier, 1997, p. 1-17. Vol. 16, Toxicologie, pathologie professionnelle, 16-781-A-40).
75. **Meyer, J. J., Kerkhoven, H., and Francioli, D.** Contribution to the ergonomic and ergophthalmological approaches of the visual adaptation of drivers, 2. In: *Vision in vehicles - VII*, edited by Gale, A. G. Amsterdam: Elsevier, 1999, p. 23-31.
76. **Meyer J. J.** L'apport de l'ergonomie dans la prévention des risques aux postes de travail sur l'écran et de contrôle de qualité avec aides visuelles. Part II: La démarche de l'ergonome et son protocole d'application. *IZA* 48(5):9-12, 2001.
77. **Meyer, J. J., Francioli, D., Michel, L., and Kerkhoven, H.** Assessment of luminous conditions for VDT stations based on ergonomical and ergophthalmological criteria, In: *Work With Display Units World Wide Work: Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Work With Display Units, Berchtesgaden, May 22-25, 2002, WWDU 2002*, edited by Luczark, H., Cakir, A. E., and Cakir, G. Berlin: Ergonomic Institut für Arbeits- und Sozialforschung Forschungsgesellschaft mbH, 2002, p. 698-700.
78. **Meyer J. J.** L'ergonomie visuelle, un facteur à prendre en compte. *Tracés* 128 (19):25-31, 2002.
79. **Michel, L., Francioli, D., and Meyer, J. J.** Digital image facilities for visual comfort evaluation, In: *International Lighting Congress, Istanbul 2001, 12-14 September*, edited by Uenver, R., Oeztürk, L. D., and Yener, A. K. Istanbul: Yıldiz Technical University Printhouse, 2001, p. 394-401.
80. **Michel, L., Scartezzini, J. L.** implementing the partial daylight factor method under a scanning sky simulator, In: *Solar Energy*. 2002, p. 473-492.
81. **Montmollin, M. de.** *L'ergonomie*. Paris: Edition la découverte, 1986.
82. **Morton, R. F.** *Epidémiologie et biostatistiques, une introduction programmée*. Paris: Doin, 1983.
83. **Ngai P.** the relationship Between Luminance Uniformity and Brightness Perception. *Illuminating Engineering society*, 2000.
84. **OFQC.** *Eclairage des bureaux*. Lausanne: EPFL LESO-PB, 1994, (RAVEL N°724.329).
85. **OMS.** *Santé et bien-être sur les lieux de travail*. Genève: 1981, (Rapport et études EURO, N°31).
86. **Perry M. J.** Fundamental vision: A glaring case. *Lighting Research & Technologie* 20(4), 1988.
87. **Piéron, H.** *La sensation*. 1ère ed. Paris: PUF, 1967, (Que sais-je, 1).
88. **Rabardel, P., Carlin, N., and Chesnais, M.** *Ergonomie, concepts et méthodes*. Toulouse: Octares, 1998.
89. **Rea, M. S.** *Lighting handbook*. 8ème ed. New York: Illuminating Engineering society of North America, 1993.
90. **Renaud, A.** *Statistique épidémiologique*. Paris: PUF, 1986, (Que sais-je).

91. **Rey, P., Meyer, J.-J.** Vision et travail, In: *Précis de physiologie du travail*. Paris: Masson, 1981, p. 429-472.
92. Rey, P., Meyer, J.-J., Scartezzini, J. L., and Golay, Y. Confort visuel, lumière naturelle et énergétique du bâtiment. Section québécoise de l'association canadienne d'ergonomie. 385-388. 1990.
93. **Rey, P., Meyer, J. J.** Vision and work, In: *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*, edited by Stellman, J. M. Geneva: ILO, 1998, p. 11.
94. **Robert G. D., Dolores N. G.** Temperature, Illumination level and the Kruithof curve. *Illuminating Engineering society*, 1990.
95. **Salsi S., Cail F., Barlier-Salsi A., and Mouzé-Amady M.** Cahiers de notes documentaires. *Hygiène et Sécurité du travail* 167:275-284, 1997.
96. **Schierz, C. and Krueger, H.** *Beleuchtung in Handbuch der Arbeitsmedizin*. Landsberg: Ecomed Verl Ges., 1996.
97. **Schierz, C.** *Wirking von Linienspektren auf die Akkommodation des Auges*. Zürich: ETH, 1996, (Thèse n°10362).
98. **Schober, H.** *Das Sehen*. Leipzig: VEB Fachburchverlag, 1964, II).
99. **Tiller D. K.** Toward a Deeper Understanding of Psychological Aspects of Lighting. *Illuminating Engineering society*, 1990.
100. **Verriest, G., Hermans G.** Vue et profession, 1. In. Bruxelles: Imprimerie médicale et scientifique, 1976, p. 159-170.
101. **Vogt, J. J., Metz, B.** Effets physiologiques et perception des ambiances thermiques, In: *Précis de physiologie du travail*, edited by Scherrer, J. Paris: Masson, 1981, p. 217-260.

ANNEXES

A-1. Calculs statistiques

A-1.1. variance des paramètres de l'estimation d'un ajustement linéaire

Soient: X_{ij} une matrice (n X m) de données = i^{ème} mesure de la j^{ème} variable

Y_i une autre variable dépendant des m variables

M_{kl} : la matrice des covariances pour les m variables X_k entre elles,

$$M_{kl} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k)(X_{il} - \bar{X}_l) \quad (\text{EQ A.1})$$

D_{kl} : la matrice inverse des covariances

V_k : vecteur de covariance entre la variable X_k et Y,

$$V_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k)(Y_i - \bar{Y}) \quad (\text{EQ A.2})$$

$Y = \sum_{j=1}^m \alpha_j (X_j - \bar{X}_j) + \bar{Y}$: le modèle multilinéaire de liaison entre les X_k et Y

La méthode des moindres carrés permet d'estimer les α_j par la formule matricielle

suivante $\bar{\alpha} = M^{-1} \bar{V} = D \bar{V} \Rightarrow \alpha_j = \sum_{k=1}^m D_{jk} V_k$ (EQ A.3). On veut estimer les écarts-types,

$S\alpha_j$, de ces paramètres.

Pour faire cette estimation il faut transformer la formule (A.3) sous la forme suivante:

$$\alpha_j = \sum_{i=1}^n U_{ji} Y_i \quad (\text{EQ A.4})$$

On a donc:

$$\alpha_j = \sum_{k=1}^m D_{jk} V_k = \sum_{k=1}^m D_{jk} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k)(Y_i - \bar{Y}) \right\} \quad (\text{en introduisant l'équation A.2})$$

$$\rightarrow \alpha_j = \sum_{k=1}^m D_{jk} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k) Y_i \right\}$$

$$\rightarrow \alpha_j = \sum_{i=1}^n Y_i \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m D_{jk} (X_{ik} - \bar{X}_k) \right\} \quad (\text{en inversant l'ordre des sommes})$$

En posant $U_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m D_{jk} (X_{ik} - \bar{X}_k)$, on retrouve la forme de l'équation A.4 . On voit que

cette matrice U_{ij} ne dépend pas de la variable Y, on peut donc les considérer comme des coefficients constants. Cela permet d'exprimer la variance des paramètres comme suit:

$$S\alpha_j^2 = S_Y^2 \sum_{i=1}^n U_{ji}^2 \quad (\text{EQ A.5}), \text{ avec } S_Y^2 \text{ la variance résiduelle des } Y_i.$$

Calcul de la variance résiduelle:

$S_Y^2 = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i')^2$ avec v le nombre de degrés de liberté ($v = n - m - 1$) et Y_i' la valeur estimée par le modèle de Y_i . En utilisant la définition du coefficient de corrélation multiple (EQ IV.) on trouve que $\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i')^2 = (1 - R_{XY}^2) \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = n(1 - R_{XY}^2) \sigma_Y^2$, σ_Y^2 étant la variance totale de Y . Ce qui donne finalement:

$$S_Y^2 = \frac{n}{n-m-1} (1 - R_{XY}^2) \sigma_Y^2 \quad (\text{EQ A.6})$$

Calcul de $\sum_{i=1}^n U_{ji}^2$

$\sum_{i=1}^n U_{ji}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^m D_{jk} (X_{ik} - \bar{X}_k) \right)^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m D_{jk} D_{jl} (X_{ik} - \bar{X}_k)(X_{il} - \bar{X}_l) \right\}$ (de part la formulation du carré d'une somme), puis en inversant l'ordre des sommes:

$\rightarrow \sum_{i=1}^n U_{ji}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m D_{jk} D_{jl} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k)(X_{il} - \bar{X}_l) \right\}$, on s'aperçoit que le terme entre accolades correspond à la covariance M_{lk} . Ce qui donne:

$\sum_{i=1}^n U_{ji}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m D_{jk} D_{jl} M_{lk} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m D_{jk} \sum_{l=1}^m D_{jl} M_{lk}$, on s'aperçoit que le terme de sommation sur l , correspond au produit des deux matrices M et D , qui par définition sont l'inverse l'une de l'autre. Ce produit donne donc la matrice unité I_{kj} (égale 1 quand $j=k$ et nulle sinon).

$$\sum_{i=1}^n U_{ji}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m D_{jk} I_{kj} = \frac{1}{n} D_{jj} \quad (\text{EQ A.7})$$

En introduisant les deux équations (A.6 et A.7) dans l'équation A.5., on trouve finalement la formule de la variance des paramètres:

$$\boxed{S\alpha_j^2 = \frac{(1 - R_{XY}^2) \sigma_Y^2}{n - m - 1} D_{jj}} \quad (\text{EQ A.8})$$

A-1.2. moyenne et écart-type d'une variable dont le logarithme suit une loi normale

Soit X une variable aléatoire telle que $Y = \text{Log}(X)$. Sachant que X suit une loi normale de moyenne m_Y et d'écart - type σ_Y , il est possible de calculer explicitement m_X et σ_X , les moyennes et écart - type de la variable X .

Le fait que Y suive une loi normale signifie que sa fonction de densité de répartition est la suivante:

$$f(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(Y-m_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} \quad (\text{EQ A.9})$$

On calcule la moyenne m_α de X^α (le moment d'ordre α de X) par la formule suivante:

$$m_\alpha = \int_{-\infty}^{+\infty} dY X^\alpha(Y) f(Y) \quad (\text{EQ A.10})$$

avec $X^\alpha(Y) = e^{\alpha Y}$

Cela donne:

$$\begin{aligned}
 m_\alpha &= \int_{-\infty}^{+\infty} dY e^{\alpha Y} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y}} e^{-\frac{(Y-m_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y}} \int_{-\infty}^{+\infty} dY e^{-\frac{(Y-m_Y)^2}{2\sigma_Y^2} + \alpha Y} = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y}} \int_{-\infty}^{+\infty} dY e^{-\frac{(Y-m_Y)^2 + 2\alpha\sigma_Y^2 Y}{2\sigma_Y^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y}} \int_{-\infty}^{+\infty} dY e^{-\frac{Y^2 + 2m_Y Y - m_Y^2 + 2\alpha\sigma_Y^2 Y}{2\sigma_Y^2}} = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y}} \int_{-\infty}^{+\infty} dY e^{-\frac{(Y-m_Y - \alpha\sigma_Y^2)^2 + (m_Y + \alpha\sigma_Y^2)^2 - m_Y^2}{2\sigma_Y^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y}} e^{-\frac{(m_Y + \alpha\sigma_Y^2)^2 - m_Y^2}{2\sigma_Y^2}} \int_{-\infty}^{+\infty} dY e^{-\frac{(Y-m_Y - \alpha\sigma_Y^2)^2}{2\sigma_Y^2}}
 \end{aligned}$$

On pose le changement de variable suivant: $Z = Y - m_Y - \alpha\sigma_Y^2 \Rightarrow dZ = dY$,
ce qui donne:

$$\begin{aligned}
 m_\alpha &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y}} e^{-\frac{(m_Y + \alpha\sigma_Y^2)^2 - m_Y^2}{2\sigma_Y^2}} \int_{-\infty}^{+\infty} dZ e^{-\frac{Z^2}{2\sigma_Y^2}}, \text{ où l'intégrale vaut } \sqrt{2\pi\sigma_Y}, \text{ ce qui fait donc:} \\
 m_\alpha &= e^{-\frac{(m_Y + \alpha\sigma_Y^2)^2 - m_Y^2}{2\sigma_Y^2}} = e^{-\frac{m_Y^2 + 2\alpha m_Y \sigma_Y^2 + \alpha^2 \sigma_Y^4 - m_Y^2}{2\sigma_Y^2}} = e^{-\frac{\alpha m_Y + \alpha^2 \sigma_Y^2}{2}} \quad (\text{EQ A.11})
 \end{aligned}$$

la moyenne m_X de X ($\alpha=1$) est alors:

$$\boxed{m_X = e^{-\frac{m_Y + \sigma_Y^2}{2}}} \quad (\text{EQ A.12})$$

L'écart – type est défini comme suit:

$$\sigma_X^2 = m_2 - m_X^2 = e^{2m_Y + 2\sigma_Y^2} - e^{2m_Y + \sigma_Y^2} = e^{2m_Y + \sigma_Y^2} (e^{\sigma_Y^2} - 1) = m_X^2 (e^{\sigma_Y^2} - 1),$$

ce qui donne finalement:

$$\boxed{\sigma_X = m_X \sqrt{e^{\sigma_Y^2} - 1}} \quad (\text{EQ A.13})$$

Il est possible d'inverser ces formules, afin d'exprimer m_Y et σ_Y en fonction de m_X et σ_X .
En partant de l'équation A.13:

$$\sigma_X = m_X \sqrt{e^{\sigma_Y^2} - 1} \Rightarrow \frac{\sigma_X^2}{m_X^2} = e^{\sigma_Y^2} - 1 \Rightarrow \frac{\sigma_X^2}{m_X^2} + 1 = e^{\sigma_Y^2} \Rightarrow \sigma_Y^2 = \text{Ln} \left[\frac{\sigma_X^2 + m_X^2}{m_X^2} \right],$$

on a finalement:

$$\boxed{\sigma_Y = \sqrt{\text{Ln} \left[\frac{\sigma_X^2 + m_X^2}{m_X^2} \right]}} \quad (\text{EQ A.14})$$

Ensuite, en introduisant cette dernière équation dans l'équation A.11

$$m_X = e^{-\frac{m_Y + \sigma_Y^2}{2}} = e^{-\frac{m_Y}{2}} e^{-\frac{\sigma_Y^2}{2}} = e^{-\frac{m_Y}{2}} \sqrt{\frac{\sigma_X^2 + m_X^2}{m_X^2}} \text{ cela donne finalement:}$$

$$\boxed{m_Y = \text{Ln} \left[\frac{m_X^2}{\sqrt{\sigma_X^2 + m_X^2}} \right]} \quad (\text{EQ A.15})$$

Un autre calcul peut être fait. Il s'agit de la moyenne et des écarts –types de $\cos(\alpha Y)$ et $\sin(\alpha Y)$.

La formulation est faite en terme de nombres complexes du cosinus ou sinus:

$$\cos(\alpha Y) = \frac{e^{i\alpha Y} + e^{-i\alpha Y}}{2} \text{ avec } i = \sqrt{-1} \text{ le nombre imaginaire.}$$

Soient:

- m_X la moyenne de $X = \cos(\alpha Y)$
- m_{2X} la moyenne de X^2

Calcul de m_X

$$m_X = \text{moyenne}(\cos(\alpha Y)) = \text{moyenne}\left(\frac{e^{i\alpha Y} + e^{-i\alpha Y}}{2}\right) =$$

$$\frac{1}{2} \text{moyenne}(e^{i\alpha Y}) + \frac{1}{2} \text{moyenne}(e^{-i\alpha Y}) = \frac{m_+ + m_-}{2}$$

On se retrouve à calculer la même moyenne que $X = \exp(\alpha Y)$ mais avec $\pm i\alpha$ comme exposant. En reprenant l'équation A.11 de m_{\square} cela donne:

$$\begin{cases} m_+ = e^{i\alpha m_Y - \alpha^2 \frac{\sigma_Y^2}{2}} \\ m_- = e^{-i\alpha m_Y - \alpha^2 \frac{\sigma_Y^2}{2}} \end{cases}$$

Et finalement on a:

$$m_X = \frac{m_+ + m_-}{2} = \frac{1}{2} \left[e^{i\alpha m_Y - \alpha^2 \frac{\sigma_Y^2}{2}} + e^{-i\alpha m_Y - \alpha^2 \frac{\sigma_Y^2}{2}} \right] = e^{-\alpha^2 \frac{\sigma_Y^2}{2}} \left[\frac{e^{i\alpha m_Y} + e^{-i\alpha m_Y}}{2} \right] \text{ et donc}$$

$$m_X = e^{-\alpha^2 \frac{\sigma_Y^2}{2}} \cos(\alpha m_Y)$$

(EQ A.16)

Calcul de m_{2X} :

S'agissant de la moyenne de \cos^2 , la trigonométrie nous permet d'exprimer le carré d'un cosinus en fonction plus simple: $\cos(2Y) = 2\cos^2(Y) - 1 \rightarrow \cos^2(Y) = \frac{\cos(2Y) + 1}{2}$, ce qui signifie que m_{2X} peut s'exprimer de la façon suivante:

$$m_{2X} = \text{moyenne}(\cos^2(\alpha Y)) = \text{moyenne}\left(\frac{\cos(2\alpha Y) + 1}{2}\right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{moyenne}(\cos(2\alpha Y))$$

$$\Rightarrow m_{2X} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} e^{-2\alpha^2 \sigma_Y^2} \cos(2\alpha m_Y)$$

Le calcul de l'écart – type est alors le suivant:

$$\sigma_X^2 = m_{2X} - m_X^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} e^{-2\alpha^2 \sigma_Y^2} \cos(2\alpha m_Y) - \left[e^{-\alpha^2 \frac{\sigma_Y^2}{2}} \cos(\alpha m_Y) \right]^2 =$$

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} e^{-2\alpha^2 \sigma_Y^2} \cos(2\alpha m_Y) - e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2} \cos^2(\alpha m_Y) =$$

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} e^{-2\alpha^2 \sigma_Y^2} \cos(2\alpha m_Y) - e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2} \left(\frac{1 + \cos(2\alpha m_Y)}{2} \right) =$$

$$\frac{1}{2} (1 - e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2}) + \frac{1}{2} \cos(2\alpha m_Y) (e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2} - 1) = e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2} (1 - e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2}) \left(\frac{1 - \cos(2\alpha m_Y)}{2} \right)$$

En remplaçant $\cos(2\alpha m_Y)$ par l'intermédiaire de la trigonométrie cela donne:

$$\sigma_X^2 = \sin^2(\alpha m_Y) e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2} (e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2} - 1)$$

soit:

$$\sigma_X = |\sin(\alpha m_Y)| e^{-\frac{\alpha^2 \sigma_Y^2}{2}} \sqrt{e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2} - 1} \quad (\text{EQ A.17})$$

Par analogie, on trouve les équations pour $\sin(\alpha Y)$:

$$m_X = e^{-\frac{\alpha^2 \sigma_Y^2}{2}} \sin(\alpha m_Y) \quad (\text{EQ A.18})$$

et

$$\sigma_X = |\cos(\alpha m_Y)| e^{-\frac{\alpha^2 \sigma_Y^2}{2}} \sqrt{e^{-\alpha^2 \sigma_Y^2} - 1} \quad (\text{EQ A.19})$$

A-1.3. Estimation de paramètres pour un ajustement non linéaire

Soient X_{ij} la matrice de données ($n \times m$), avec m variables et n individus, \bar{X}_i , vecteur correspondant aux m valeurs mesurées de la variable pour l'individu i , et Y_i la variable qui dépend des m autres variables, avec $\bar{\alpha}$ ou α_k la liste des np paramètres (k allant de 1 à np) que l'on veut estimer selon $F(\bar{X}_i, \bar{\alpha})$ le modèle étudié.

$C(\bar{\alpha}) = \sum_{i=1}^n (Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}))^2$ la fonction à minimiser pour l'estimation des paramètres.

On veut estimer, non seulement les paramètres $\bar{\alpha}$, mais aussi leur variance \bar{S}_α . Ce calcul ne pouvant se faire explicitement, il faut passer par un algorithme de calcul numérique. La minimisation de la fonction $C(\bar{\alpha})$ se fait par l'intermédiaire de la résolution du système d'équations: $\frac{\partial C}{\partial \bar{\alpha}} = 0$. Soit $G_j(\bar{\alpha}) = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial \alpha_j}$, le système d'équations est donné par $G_j(\bar{\alpha}) = 0, \forall j \in [1, np]$, ou $\bar{G}(\bar{\alpha}) = 0$ en notation matricielle.

Calcul de G_j:

$$G_j(\bar{\alpha}) = \frac{1}{2} \frac{\partial \left(\sum_{i=1}^n [Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha})]^2 \right)}{\partial \alpha_j} = \frac{2}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial \alpha_j} [Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha})]$$

$$G_j(\bar{\alpha}) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial \alpha_j} [Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha})] = 0 \quad (\text{EQ A. 20})$$

C'est ce système d'équations (j allant de 1 à np) qu'il faut résoudre par calcul numérique. Le principe de ce dernier est de donner des valeurs initiales ($\bar{\alpha}_0$) aux paramètres à estimer, puis d'effectuer un certain nombre de calculs itératifs tendant vers la solution. Pour déterminer cette formule d'itération, il faut faire une approximation linéaire au voisinage de $\bar{\alpha}_0$ et trouver $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_0 + \bar{\Delta}$, solution du système d'équations linéaires résultant.

$$G_j(\bar{\alpha}_0 + \bar{\Delta}) = G_j(\bar{\alpha}_0) + \frac{\partial G_j(\bar{\alpha}_0)}{\partial \bar{\alpha}} \bar{\Delta}. \text{ En notation indicielle cette équation devient:}$$

$$G_j(\bar{\alpha}_0 + \bar{\Delta}) = G_j(\bar{\alpha}_0) + \sum_{k=1}^{np} \frac{\partial G_j(\bar{\alpha}_0)}{\partial \alpha_k} \Delta_k. \text{ Si on revient en notation matricielle, on a:}$$

$$\bar{G}(\bar{\alpha}_0 + \bar{\Delta}) = \bar{G}(\bar{\alpha}_0) + M(\bar{\alpha}_0) \bar{\Delta} \quad (\text{EQ A.21})$$

avec M, une matrice qui s'apparente à la matrice de covariance du cas linéaire:

$$M_{jk}(\bar{\alpha}_0) = \frac{\partial G_j(\bar{\alpha}_0)}{\partial \alpha_k} \quad (\text{EQ A.22})$$

Comme on l'a mentionné plus haut, on cherche $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_0 + \bar{\Delta}$ tel que $\bar{G}(\bar{\alpha}_1) = 0$. Le système d'équation linéaire, dont la solution est $\bar{\alpha}_1$, déduit de l'équation A.21 est le suivant:

$$\bar{G}(\bar{\alpha}_0) + M(\bar{\alpha}_0)(\bar{\alpha}_1 - \bar{\alpha}_0) = 0 \quad (\text{EQ A.23})$$

Soit D la matrice inverse de M. On peut alors écrire la solution de ce système d'équations:

$$\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_0 + D(\bar{\alpha}_0) \bar{G}(\bar{\alpha}_0), \text{ que l'on transforme en équation de récurrence:}$$

$$\bar{\alpha}_{p+1} = \bar{\alpha}_p + D(\bar{\alpha}_p) \bar{G}(\bar{\alpha}_p) = \bar{\alpha}_p + D(\bar{\alpha}_p) \sum_{i=1}^n \frac{\partial F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)}{\partial \bar{\alpha}} [Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)] \quad (\text{EQ A.24})$$

Alors qu'on ne peut pas déterminer explicitement la matrice D, on peut le faire pour M qui, rappelons le, est l'inverse de D.

Reprenons l'équation A.22, et introduisons l'expression de $G_j(\bar{\alpha})$ (équation A.20):

$$M_{jk}(\bar{\alpha}_p) = \frac{\partial G_j(\bar{\alpha}_p)}{\partial \alpha_k} = \frac{\partial}{\partial \alpha_k} \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\partial F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)}{\partial \alpha_j} [Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)] \right\} \Rightarrow$$

$$M_{jk}(\bar{\alpha}_p) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial^2 F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)}{\partial \alpha_k \partial \alpha_j} [Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)] - \frac{\partial F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)}{\partial \alpha_k} \frac{\partial F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_p)}{\partial \alpha_j} \right\} \quad (\text{EQ A.25})$$

S'agissant de calculer les variances $\bar{S}^2(\bar{\alpha}_{p+1})$ des paramètres $\bar{\alpha}_{p+1}$, on peut les estimer par analogie avec le modèle linéaire. On reprend l'équation A.5, en sachant que les matrices M et D ont exactement le même rôle dans le cas linéaire et non linéaire:

On avait $S\alpha_j^2 = S_Y^2 \sum_{i=1}^n U_{ji}^2$ avec S_Y^2 la variance résiduelle et d'après le modèle linéaire :

$\sum_{i=1}^n U_{ji}^2 = \frac{1}{n} D_{jj}$. Dans le modèle non linéaire cela donne ceci :

$$S_Y^2(\bar{\alpha}_p) = \frac{\sum_{i=1}^n [Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_{p+1})]^2}{n - np - 1} \quad (\text{EQ A.26})$$

et

$$\sum_{i=1}^n U_{ji}^2(\bar{\alpha}_p) = \frac{1}{n} D_{jj}(\bar{\alpha}_p) \Leftrightarrow \frac{1}{n} \bar{D}(\bar{\alpha}_p) \quad (\text{EQ A.27})$$

$$\text{et donc } \bar{S}^2(\bar{\alpha}_{p+1}) = S_Y^2(\bar{\alpha}_{p+1}) \frac{1}{n} \bar{D}(\bar{\alpha}_p)$$

Remarques :

- 1) Dans le cas non linéaire, la variance résiduelle et la matrice D dépendent des paramètres.
- 2) Pour la variance résiduelle, on utilise les paramètres à l'ordre p+1 ($\bar{\alpha}_{p+1}$) et non à l'ordre p ($\bar{\alpha}_p$). En fait, cette variance résiduelle est calculée par rapport aux paramètres estimés. L'équivalent de la matrice de covariance (M), et donc son inverse (D), se définit par rapport aux paramètres avant l'itération.

$$\bar{S}^2(\bar{\alpha}_{p+1}) = \frac{\sum_{i=1}^n [Y_i - F(\bar{X}_i, \bar{\alpha}_{p+1})]^2}{n - np - 1} \frac{\bar{D}(\bar{\alpha}_p)}{n} \quad (\text{EQ A.28})$$

A-1.4. Ajustement non linéaire: exemple de la courbe acuité contraste

Le modèle de la courbe acuité – contraste pour le test sur écran est de la forme suivante:

$$A(C) = A_m \left(1 - \frac{\text{Ln}(C)}{\text{Ln}(C_0)} \right) \quad (\text{EQ A.29})$$

Dans ce modèle, C étant le contraste et A l'acuité, il y a deux paramètres à estimer: C_0 et A_m . On voit que, par rapport à ces paramètres, ce modèle est non linéaire. Mais, ici, il est possible d'estimer explicitement ces paramètres ainsi que la variance pour A_m (malheureusement pas pour C_0).

La fonction à minimiser est la suivante:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [A_i - A(C_i)]^2 &= \sum_{i=1}^n \left[A_i - A_m \left(1 - \frac{\text{Ln}(C_i)}{\text{Ln}(C_0)} \right) \right]^2 = \\ \sum_{i=1}^n \left[A_i^2 + A_m^2 \left(1 - \frac{\text{Ln}(C_i)}{\text{Ln}(C_0)} \right)^2 - 2 A_m \left(1 - \frac{\text{Ln}(C_i)}{\text{Ln}(C_0)} \right) \right] &= F(A_m, C_0) \end{aligned}$$

Cela revient donc à minimiser la quantité $F(A_m, C_0)$ en résolvant, à cet effet, le système

$$\text{d'équation: } \frac{\partial F}{\partial A_m} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial C_0} = 0. \text{ et, en posant } X = \text{Ln}(C),$$

$$\frac{\partial F}{\partial A_m} = 2 \frac{A_m}{\text{Ln}^2(C_0)} \sum_{i=1}^n (\text{Ln}(C_0) - X_i)^2 - 2 \frac{1}{\text{Ln}(C_0)} \sum_{i=1}^n A_i (\text{Ln}(C_0) - X_i) = 0$$

$$\Rightarrow A_m \sum_{i=1}^n (\text{Ln}(C_0) - X_i)^2 = \text{Ln}^2(C_0) \sum_{i=1}^n A_i - \text{Ln}(C_0) \sum_{i=1}^n X_i A_i$$

Ensuite, développant cette expression, on la divise par n et enfin, pour alléger l'écriture, on pose que moyenne(X^2) = ε_2 , moyenne(A) = \bar{A} et moyenne(XA) = P .

Cela donne finalement:

$$A_m \text{Ln}^2(C_0) + A_m \varepsilon_2 - 2 A_m \text{Ln}(C_0) \bar{A} = \text{Ln}^2(C_0) \bar{Y} - \text{Ln}(C_0) P \quad (\text{EQ A.30})$$

On procède même avec la dérivation par rapport à C_0 , afin de déterminer la deuxième équation du système:

$$\frac{\partial F}{\partial C_0} = 2 \frac{A_m^2}{C_0 \text{Ln}^2(C_0)} \sum_{i=1}^n X_i - 2 \frac{A_m^2}{C_0 \text{Ln}^3(C_0)} \sum_{i=1}^n X_i^2 - 2 \frac{A_m}{C_0 \text{Ln}^2(C_0)} \sum_{i=1}^n X_i A_i = 0$$

$$\text{ce qui se simplifie de la façon suivante } A_m \sum_{i=1}^n X_i - \frac{A_m}{\text{Ln}(C_0)} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \sum_{i=1}^n X_i A_i = 0$$

On isole $\text{Ln}(C_0)$ et, en reprend les notations de l'équation A.30,

$$\text{Ln}(C_0) = \frac{A_m \varepsilon_2}{A_m \bar{X} - P} \quad (\text{EQ A.31})$$

Ensuite, on introduit cette équation A.31 dans l'équation A.30, ce qui donne, en simplifiant :

$$A_m^2 (\varepsilon_2 - \bar{X}^2) = A_m (\varepsilon_2 \bar{A} - P \bar{X}), \text{ avec, selon la définition de } \sigma_X^2, a: \sigma_X^2 = \varepsilon_2 - \bar{X}^2; \text{ de même, on a : } C_{XA} = P - \bar{X} \bar{A} \text{ (covariance de X et Y). On trouve finalement que}$$

$$A_m = \bar{A} - \bar{X} \frac{C_{XA}}{\sigma_X^2}, \text{ en se rappelant que } X = \text{Ln}(C). \quad (\text{EQ A.32})$$

A_m étant estimé, il suffit de remplacer A_m dans l'équation A.31 pour déterminer C_0 :

$$\text{Ln}(C_0) = \frac{A_m (\sigma_X^2 + \bar{X}^2)}{A_m \bar{X} - C_{XA} - \bar{X} \bar{A}} \quad (\text{EQ A.33})$$

Il est possible de calculer la variance de A_m , car la formule A.32 peut se transformer en formule du type A.4: $\alpha_j = \sum_{i=1}^n U_j Y_i$ qui, dans ce cas, donnerait $A_m = \sum_{i=1}^n U_i A_i$.

En reprenant l'équation A.32:

$$A_m = \bar{A} - \bar{X} \frac{C_{XA}}{\sigma_X^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(A_i - \bar{X} \frac{A_i (X_i - \bar{X})}{\sigma_X^2} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left(1 - \bar{X} \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma_X^2} \right) A_i$$

$$\text{où l'on pose } U_i = \frac{1}{n} \left(1 - \bar{X} \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma_X^2} \right)$$

On introduit l'équation A.5 de la variance des paramètres: $S\alpha_j^2 = S_Y^2 \sum_{i=1}^n U_j^2$, qui dans notre

$$\text{cas se traduit comme ceci } S_{A_m}^2 = S_A^2 \sum_{i=1}^n U_i^2$$

$$S_A^2 = \text{variance résiduelle} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (A_i - A_i')^2 = \frac{n}{n-2} \sigma_A^2 (1 - R_{XA}^2) \text{ avec } R_{XA} \text{ le coefficient}$$

de corrélation entre la variable X (= Ln(C)) et A.

Avec:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n U_i^2 &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{n^2} \left(1 - \bar{X} \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma_X^2} \right)^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \left(1 + \bar{X}^2 \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sigma_X^4} - 2\bar{X} \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma_X^2} \right) = \\ &= \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \left(1 + \bar{X}^2 \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sigma_X^4} \right) = \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{n\sigma_X^2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\bar{X}^2}{\sigma_X^2} \right) \end{aligned}$$

on peut finalement écrire la variance de Am:

$$S_{Am}^2 = \frac{1}{n-2} \sigma_A^2 (1 - R_{XA}^2) \left(1 + \frac{\bar{X}^2}{\sigma_X^2} \right) \quad (\text{EQ A.34})$$

Quant au paramètre C_0 , il n'est pas possible de trouver une expression mathématique de sa variance, car il est impossible de transformer l'équation (A.33) sous la forme de l'équation A.4. Pour pouvoir estimer cette variance il faut passer par l'algorithme numérique de l'ajustement non linéaire (voir paragraphe A.1.3).

A-1.5. Test de linéarité

Pour démontrer l'équation 3.33, il faut partir de la somme (\square_R) permettant l'estimation de la variance résiduelle.

Dans le cas du plan d'expérience:

$$\begin{aligned} \Sigma_R &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - Y_i')^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i + \bar{Y}_i - Y_i')^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{Y}_i - Y_i')^2 = \\ &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 + \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - Y_i')^2 = \Sigma_A + \Sigma_Y \end{aligned}$$

\square_A = somme servant à l'estimation de la variance intra – individuelle (S_A^2) et

\square_Y = somme servant à l'estimation de la variance inter – individuelle (S_Y^2)

$$\Sigma_A = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^k n_i \sigma_i^2 \Rightarrow S_A^2 = \frac{\Sigma_A}{n-k} = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k n_i \sigma_i^2 \quad (n-k \text{ degrés de libertés})$$

Puis:

$$\begin{aligned} \Sigma_Y &= \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - Y_i')^2 = \sum_{i=1}^k n_i [\bar{Y}_i - \bar{Y} - \alpha(X_i - \bar{X})]^2 = \sum_{i=1}^k n_i \left[\bar{Y}_i - \bar{Y} - \frac{C_{XY}}{\sigma_X^2} (X_i - \bar{X}) \right]^2 = \\ &= \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 + \frac{C_{XY}^2}{\sigma_X^4} \sum_{i=1}^k n_i (X_i - \bar{X})^2 - 2 \frac{C_{XY}}{\sigma_X^2} \sum_{i=1}^k n_i (X_i - \bar{X})(\bar{Y}_i - \bar{Y}) \end{aligned}$$

On pose: $C_{X\bar{Y}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i (X_i - \bar{X})(\bar{Y}_i - \bar{Y})$, il est facile de voir que $C_{X\bar{Y}} = C_{XY}$, donc:

$$\Sigma_Y = n\sigma_{\bar{Y}}^2 + n \frac{C_{X\bar{Y}}^2}{\sigma_X^2} - 2n \frac{C_{X\bar{Y}}}{\sigma_X^2} = n\sigma_{\bar{Y}}^2 (1 - R_{X\bar{Y}}^2)$$

On en déduit que

$$S_Y^2 = \frac{\Sigma Y}{k-2} = \frac{n}{k-2} \sigma_Y^2 (1 - R_{XY}^2) \quad (k-2) \text{ degrés de liberté.}$$

Et en appliquant le test de Fsnedecor :

$$F = \frac{S_Y^2}{S_A^2} = \frac{(n-k)n}{k-2} \frac{\sigma_Y^2 (1 - R_{XY}^2)}{\sum_{i=1}^k n_i \sigma_i^2} \quad (\text{EQ A.35})$$

A-1.6. Démonstration formule de PGG

La formule est la suivante:

$$PGG(SL, SEGS, SLE) = \begin{cases} 100 & \text{si } \max(\text{PMT}, \text{PEE}) + \max(\text{PET}, \text{PME}) > 100 \\ \max(\text{PMT}, \text{PEE}) + \max(\text{PET}, \text{PME}) & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{eq A.36})$$

Rappelons que dans cette équation nous avons:

- PEE: probabilité d'un entourage éblouissant (eq 5.9);
- PME: probabilité d'un entourage sombre (eq 5.15);
- PET: probabilité d'une tâche éblouissante (eq 5.8);
- PMT: probabilité d'une tâche sombre (eq 5.7);
- SL: sentiment de luminosité produit par la tâche (eq 5.1 et 5.2);
- SEGS: sentiment d'éblouissement dû à l'environnement (eq 5.3);
- SLE: sentiment de luminosité dû à l'environnement (eq 5.14).

En fait, SEGS et SL sont des fonctions qui sont du même genre mais qui vont dans un sens opposé l'une par rapport à l'autre. Il existe une liaison entre les deux qui fait que si l'entourage paraît éblouissant, alors la tâche paraît sombre et inversement. Concernant la tâche, les probabilités PET et PMT correspondent à des conditions du genre $SL \leq SL_0$ (pour PMT) et $SL > SL_1$ (pour PET). Les limites SL_0 et SL_1 sont fixées. Concernant l'entourage, plus particulièrement pour l'éblouissement PEE, nous avons des conditions du même genre mais avec, pour SEGS, $SEGS > SEFS_0$. Or, les fonctions SEGS et SL étant liés, la condition faite sur SEGS a son équivalent sur SL:

$SEGS > SEFS_0 \Rightarrow SL \leq SL_2$ où SL_2 dépendent des conditions lumineuses. Pour l'environnement sombre, on peut établir ce même type de relations, ce qui correspond à la condition où $SL > SL_3$.

En résumé on a:

- si $SL \leq SL_0$, la tâche paraît sombre ;
- si $SL \leq SL_2$, l'environnement paraît éblouissant ;
- si $SL > SL_1$, la tâche paraît éblouissante ;
- si $SL > SL_3$, l'environnement paraît sombre.

SL_0 et SL_1 sont fixes, alors que SL_2 et SL_3 varient en fonction des conditions. Ainsi, on peut, par exemple, déterminer la fourchette correspondant à l'absence de gêne :

$SL \in]\max(SL_0, SL_2), \min(SL_1, SL_3)]$ et PGG est la probabilité d'être en dehors de cette fourchette. Il est toutefois inutile de calculer les SL_i , car $\max(SL_0, SL_2)$ revient à prendre $\max(\text{PMT}, \text{PEE})$ et de même $\min(SL_1, SL_3)$ revient à prendre $\max(\text{PET}, \text{PME})$, ce qui permet d'écrire que $PGG = \max(\text{PMT}, \text{PEE}) + \max(\text{PET}, \text{PME})$. Cependant il peut arriver que: $\max(SL_0, SL_2) > \min(SL_1, SL_3)$, auquel cas il n'y a plus de fourchette de confort, cela se traduit par: $PGG = \max(\text{PMT}, \text{PEE}) + \max(\text{PET}, \text{PME}) > 100$. Dans ce cas là PGG vaut automatiquement 100%. C'est ce qui nous permet de tomber sur l'équation A.36.

A-2. MTF (Fonction de Transfert de la Modulation)

A-2.1. Cas général de la MTF, analyse de Fourier

Du point de vue physique, cette fonction permet de décrire la qualité de transmission d'une lentille, à laquelle on peut assimiler l'œil. Cette fonction représente la perte de contraste, du au passage de la lentille, d'un signal spatialement périodique (voir figure A.1).

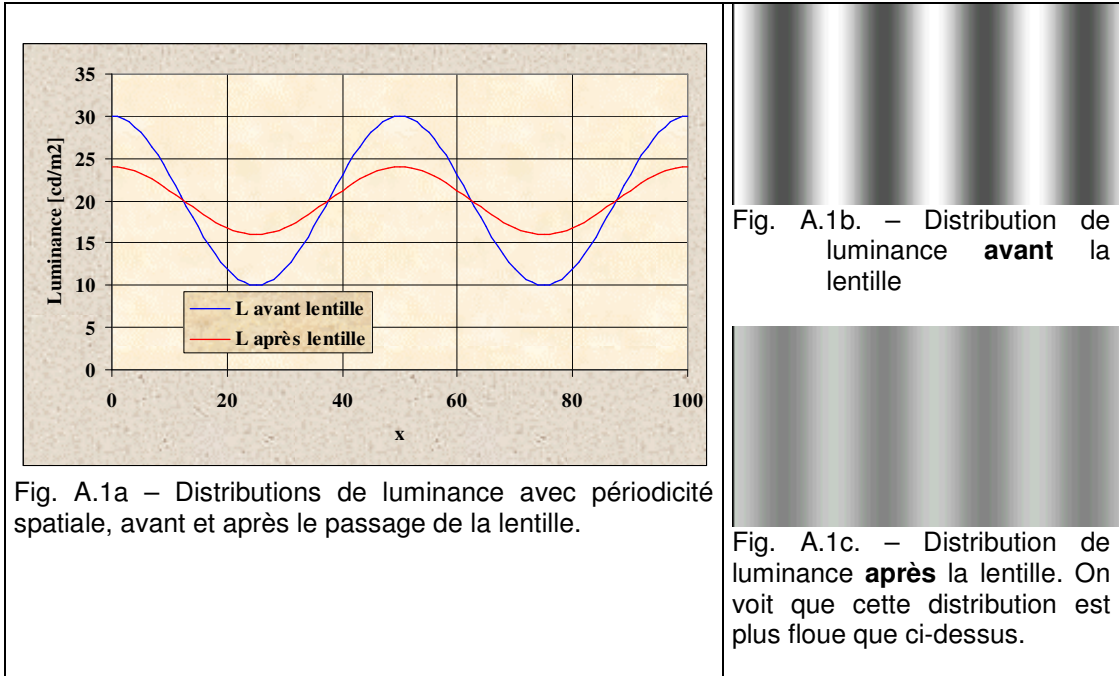


Figure A.1. Exemples de distribution de luminance spatialement périodique, avant et après la transmission par une lentille. A gauche, la représentation mathématique de cette distribution ; à droite l'image correspondante.

L'analyse de Fourier est un outil mathématique qui permet de calculer l'image résultante de la transmission par la lentille quelle que soit la distribution de luminance incidente.

Soient: $L_0(x)$, distribution de luminance incidente ;
 $\tilde{L}_0(v)$, transformée de Fourier de cette distribution ;
 $T(v)$, fonction de transfert (MTF) ;
 $IT(x)$, transformée de Fourier inverse de $T(v)$;
 $L_1(x)$, distribution de luminance à la sortie ;
 $\tilde{L}_1(v)$, transformée de Fourier de cette distribution.

Entre les deux distributions, on a la relation suivante : $\tilde{L}_1(v) = T(v)\tilde{L}_0(v)$

Si on applique la transformation de Fourier inverse de cette équation cela donne:

$L_1(x) = IT(x) \otimes L_0(x)$. Le membre de droite désigne le produit de convolution entre $IT(x)$ et $L_0(x)$:

$$L_1(x) = \int dy IT(x-y)L_0(y) \quad (\text{EQ A.39})$$

On peut généraliser cette formule à deux dimensions:

$$L_1(x,y) = \iint dx' dy' IT(x-x', y-y')L_0(x',y') \quad (\text{EQ A.40})$$

A-2.2. MTF cas de l'œil

Nous avons trouvé un modèle pour la MTF de l'œil à la page 10, équation E3 (eq 2.20, page 30 du document principal, réf.39):

La $MTF=T(v)=\exp(-\theta v)$ correspond à un modèle à une dimension, alors que, dans le cas de l'œil, il faut considérer les deux dimensions correspondant aux deux angles de repérage (σ, τ) . L'angle σ correspond à la distance angulaire entre le point repéré et l'axe de la vision, et l'angle τ correspond à l'angle dans un plan vertical (voir figure 19). La valeur θ ayant les dimensions d'un angle, mesure globalement la qualité optique de l'œil. Ce paramètre dépend entre autres du diamètre pupillaire et de l'âge.

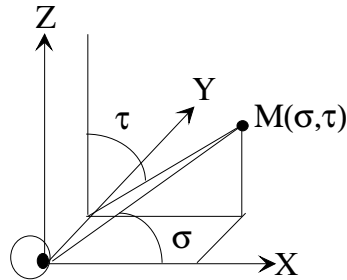


Figure A.2- Définition des angles repérant le point M dans le champ visuel. X est l'axe du regard, Z est l'axe verticale et Y l'autre axe.

Une généralisation simple de la MTF en 2 dimensions serait le produit des MTF en 1 dimension:

$$T(v_{\sigma}, v_{\tau}) = \exp(-\theta v_{\sigma}) \exp(-\theta v_{\tau}) \quad (\text{EQ A.41})$$

Remarque: nous avons le même facteur θ pour l'angle σ et l'angle τ . On peut imaginer que dans le cas de l'astigmatisme (courbure de la cornée différente suivant les directions), il y aurait deux valeurs différentes de θ . Cela permettrait alors de calculer les conséquences de ce défaut sur l'acuité en fonction de l'orientation des caractères.

Nous recherchons la fonction $IT(\sigma, \tau)$ qui est la transformée de Fourier inverse de T:

$$IT(\sigma, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} dv_{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{\tau} [\exp(i\sigma v_{\sigma}) \exp(i\tau v_{\tau}) T(v_{\sigma}, v_{\tau})] \quad (\text{EQ A.42})$$

Attention: étant donné que nous intégrons de $-\infty$ à $+\infty$, il faut modifier la formule de T, en prenant la valeur absolue des fréquences: $T(v_{\sigma}, v_{\tau}) = \exp(-\theta |v_{\sigma}|) \exp(-\theta |v_{\tau}|)$, car sinon la fonction ne serait pas intégrable. On a alors:

$$IT(\sigma, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} dv_{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{\tau} [\exp(i\sigma v_{\sigma}) \exp(i\tau v_{\tau}) \exp(\theta |v_{\sigma}|) \exp(\theta |v_{\tau}|)] \quad (\text{EQ A.43})$$

Cette intégrale se calcule analytiquement et le résultat est :

$$IT(\sigma, \tau) = \frac{\theta^2}{\pi^2 (\theta^2 + \sigma^2) (\theta^2 + \tau^2)} \quad (\text{EQ A.44})$$

Et dans le cas de l'astigmatisme on aurait:

$$IT(\sigma, \tau) = \frac{\theta_{\sigma} \theta_{\tau}}{\pi^2 (\theta_{\sigma}^2 + \sigma^2) (\theta_{\tau}^2 + \tau^2)} \quad (\text{EQ A.45})$$

A-3. Définitions

A-3.1. Grandeurs photométriques

Toutes les définitions concernant les grandeurs photométriques ont été extraites des ouvrages [AFE1991] et [RAVEL1993a]. Les deux grandeurs les plus utilisées dans ce travail sont l'éclairement et la luminance.

A-3.1.1 Flux lumineux Φ [lumen][lm]

Energie lumineuse qui traverse une surface dans un sens donné, par unité de temps. Le flux lumineux Φ [lm], caractéristique d'un rayonnement électromagnétique, est lié au flux d'énergie Φ_e [W] propre à ce même rayonnement, par le biais de la courbe de sensibilité spectrale $V(\lambda)$ illustrée à la figure A-3.

$$\Phi = 683 \cdot \int V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (\text{EQ A.46})$$

C'est par la formule A.46 que l'on passe des grandeurs énergétiques aux grandeurs photométriques.

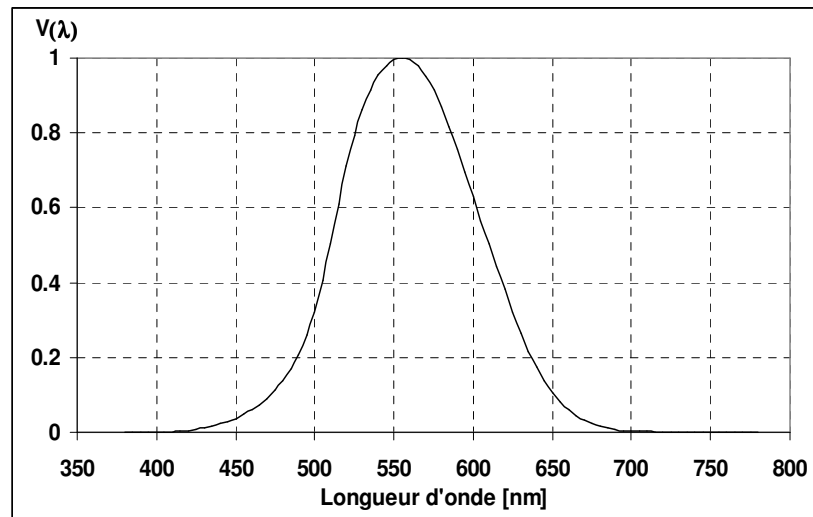


Figure A-3. Sensibilité spectrale relative de l'observateur de référence (en vision photopique) [CIE1983]. .

A-3.1.2. Eclairement : E [lux][lx]

Flux lumineux $d\Phi$ [lm] reçu par unité de surface dS [m²].

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right] \quad (\text{EQ A.47})$$

Si la surface est de dimensions finies, on peut faire la moyenne arithmétique de toutes les valeurs ponctuelles, ce qui conduit à intégrer $d\Phi$ sur toute la surface considérée :

$$E = \frac{1}{S} \int_S d\Phi \quad (\text{EQ A.48})$$

Couloir sombre	20-30 lx
Bureau éclairé	100 – 1000 lx
Bureau pénétration du soleil	40000 lx
Recommandations pour un travail de bureau informatisé	300 – 500 lx
Recommandations pour un travail de précision	2000 lx
Extérieur par temps gris moyen	16000 lx
Extérieur par temps ensoleillé	60000 lx

Tableau A-1. Quelques valeurs caractéristiques d'éclairément.

A-3.1.3. Intensité : I [candela][cd]

Flux lumineux $d\Phi$ [lm], émis par une source par unité d'angle solide $d\Omega$ [stéradian][sr] dans une direction donnée.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \left[\frac{\text{lm}}{\text{sr}} \right] \quad (\text{EQ A.49})$$

A-3.1.4. Luminance : L [cd/m²]

Quotient du flux lumineux $d\Phi$ [lm], émis ou réfléchi par unité de surface dS [m²] d'une source, dans une direction définie par un cône élémentaire, par le produit de l'élément d'angle solide $d\Omega$ [sr] correspondant et de la surface apparente de l'élément de surface dS (voir figure A-4).

$$L = \frac{dI}{dS \cdot \cos(\theta)} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos(\theta)} \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (\text{EQ A.50})$$

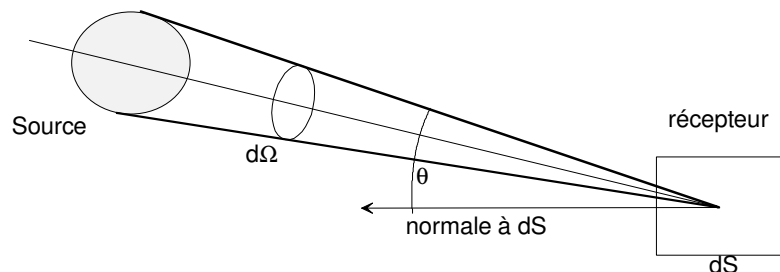


Figure A-4. Illustration de la définition de la luminance d'une surface émettrice

On peut remarquer que l'éclairément dans le plan de la surface réceptrice est :

$$E = \frac{d\Phi}{dS \cdot \cos(\theta)} \quad (\text{EQ A.51})$$

ce qui permet d'exprimer la luminance en fonction de l'éclairément sur le récepteur :

$$L = \frac{dE}{d\Omega \cdot \cos(\theta)} \quad (\text{EQ A.52})$$

Si on est en présence d'une surface lambertienne (parfaitement diffusante), alors le coefficient de réflexion de la surface vaut :

$$\rho = \frac{\pi \cdot L}{E} \quad (\text{EQ A.53})$$

Un exemple de surface "lambertienne" est la feuille de papier dont le coefficient de réflexion est proche 75%, ce qui permet de déduire sa luminance lorsque l'on connaît l'éclairement qu'elle reçoit :

$$L = 0.75 \frac{E}{\pi} \approx \frac{E}{4} \quad (\text{EQ A.54})$$

Dans un bureau : mur blanc éclairé artificiellement	20 – 100 cd/m ²
Ecran CRT normal réglé au maximum:	100 cd/m ²
Ecran plat réglé au maximum :	200 – 300 cd/m ²
Feuille de papier vue sous un éclairage artificiel normal	120 cd/m ²
Feuille de papier vue à l'extérieur sous temps gris moyen	4000 cd/m ²
Feuille de papier vue à l'extérieur au soleil en été	15000 cd/m ²
Lampe nue de néon	12000 cd/m ²
Ciel bleu	1000 – 5000 cd/m ²
Arc électrique de soudure	> 10 ⁶ cd/m ²
Soleil	> 10 ⁹ cd/m ²

Tableau A-2. Quelques valeurs caractéristiques de luminances.

A-3.1.5. Contrastes : C [-,%]

Le contraste définit la différence de luminosité entre un objet et le fond sur lequel il se détache, cette différence permettant à l'œil de repérer cet objet. Il peut être défini par un certain nombre de définitions mathématiques suivant les cas.

Contraste caractère – tâche (travail de lecture de document) (C):

Dans ce cas, il y a deux types de contrastes :

- contraste positif : le caractère est sombre sur un fond clair ;
- contraste négatif : le caractère est clair sur un fond sombre.

Dans cette recherche, nous avons défini mathématiquement le contraste comme suit :

$$C = \frac{\max(L_t, L_c) - \min(L_t, L_c)}{\max(L_t, L_c)}, \quad (\text{EQ A.55})$$

avec L_t = luminance de la tâche : fond sur lequel se détache le caractère ;
 L_c = luminance du caractère.

Contraste entourage – tâche (C_{EC}):

Soit L_{eq} une luminance définissant l'entourage (luminance d'entourage équivalent) :

$$L_{EQ} = EY \left[\frac{I}{1-I} \right]^k \quad (\text{EQ A.56})$$

EY étant l'éclairement reçu par les yeux, I le facteur d'hétérogénéité de la distribution lumineuse du champ visuel (voir définition plus loin), et k une constante estimée au cours de l'expérience.

Alors, le contraste est simplement défini par :

$$C_{EC} = \frac{L_{EQ}}{L_T} \quad (\text{EQ A.57})$$

A-3.1.6. Facteur d'hétérogénéité : I [-,%]

Il existe un certain nombre de définitions possibles de ce facteur. La plus employée est utilisée par les éclairagistes dans le cas de distributions d'éclairements horizontaux dans les locaux de travail :

$$I = \frac{\text{plus petite valeur d'éclairement mesurée}}{\text{éclairement moyen}} \quad (\text{EQ A.58})$$

Si cette formule a l'avantage d'être simple, elle ne peut toutefois pas se transposer directement dans le cas de l'évaluation de l'inhomogénéité d'une distribution de luminance. En effet, la valeur minimale de luminance dans un champ visuel est beaucoup trop anecdotique. Il suffit de mettre un tapis de souris pour faire varier ce facteur de manière artificielle. Dans ce cas, on pourrait prendre la luminance maximale, ce qui est moins anecdotique, car il s'agit le plus souvent des sources de lumières. Mais, alors, on ne tient pas compte de la taille, du nombre et de l'emplacement de ces sources lumineuses, ce qui entraîne une faible différenciation des situations (les sources lumineuses émettant par ailleurs le plus souvent des luminances comparables entre elles). C'est pourquoi nous proposons deux nouvelles définitions, nécessitant la connaissance de la distribution de luminance ($L(\sigma, \tau)$), mais caractérisant plus correctement ce facteur :

1) Soit la première définition I = rapport entre l'écart-type de la distribution de luminance et la luminance moyenne :

$$I = \frac{\sigma_L}{\bar{L}} = \frac{\sqrt{\iint d\Omega L^2(\sigma, \tau) - \bar{L}^2}}{\bar{L}} = \frac{\sqrt{\iint d\Omega L^2(\sigma, \tau) - \left(\frac{EY}{\pi}\right)^2}}{EY} \pi \quad (\text{EQ A.59})$$

2) La deuxième définition vient de la constatation qu'une source lumineuse brise l'homogénéité du champ visuel, car la part de lumière qu'elle apporte est beaucoup plus importante que ce qu'elle représente en terme de surface apparente.

Ce raisonnement se traduit mathématiquement :

$$I = \frac{E_s}{EY} - \frac{\Omega_s}{\pi} \quad (\text{EQ A.60})$$

avec I = inhomogénéité due à la source S ;

E_s = éclairement au niveau des yeux direct provenant de la source S ;

Ω_s = angle solide projeté de la source S ;

EY = éclairement total au niveau des yeux ;

On généralise ce facteur pour un champ visuel comprenant n sources diverses :

$$I = \frac{\sum E_s}{EY} - \frac{\sum \Omega_s}{\pi} = \frac{E_d}{EY} - \frac{\Omega_d}{\pi} \quad (\text{EQ A.61})$$

Avec E_d la quantité totale d'éclairement "direct" : éclairement provenant de l'ensemble des sources lumineuses et Ω_d l'angle solide projeté de l'ensemble de ces sources.

Cet indice varie entre 0 et 1, 0 correspondant à l'homogénéité parfaite et plus il augmente plus l'hétérogénéité augmente.

Exemple numérique : une lampe de 10000 cd/m² au centre du champ visuel représentant un angle de 10° se détachant sur un fond homogène de 10 cd/m². Son angle solide vaut

$$\text{alors } \Omega_s = \pi \left(\frac{1 - \cos(2 \cdot 10^\circ)}{2} \right) = 0.095 \text{ sr,}$$

son éclairement direct $E_s = L_s \cdot \Omega_s = 10000 \cdot 0.095 \approx 950 \text{ lx}$.

L'éclairement total vaut : $EY = E_s + 10 \cdot (\pi - \Omega_s) \approx 978 \text{ lx}$. Enfin, l'indice d'hétérogénéité vaut alors : $I_s \approx 0.939$. Si maintenant cette lampe a une luminance de 1000 cd/m², on trouvera alors : $I_s \approx 0.726$, ce qui signifie que cette dernière brise nettement moins l'homogénéité du champ visuel, ce qui était attendu.

Dans cette étude, la définition choisie de l'inhomogénéité était celle-ci.

A-3.1.7. Luminance d'entourage équivalent [cd/m²]

Cette luminance représente la luminosité moyenne de la zone du champ visuel entourant la tâche. Elle sert à définir le contraste entre cet entourage et la tâche. Sa définition mathématique est la suivante :

$$L_{EQ} = EY \left(\frac{1}{1-I} \right)^k \quad (\text{EQ A.62})$$

avec EY l'éclairement au niveau des yeux et I le facteur d'hétérogénéité (deuxième définition). L'exposant k est un paramètre à estimer.

A-3.2. Grandeurs physiologiques

A-3.2.1. Acuité visuelle

L'acuité est définie comme l'inverse de la taille en minute d'angle du plus petit détail que l'œil peut percevoir.

$$A = \frac{\pi}{10800} \arctan\left[\frac{\varepsilon}{2D}\right] \quad (\text{EQ A.63})$$

□ correspondant à la taille du détail, et D la distance entre le test et l'œil.

Les caractères alphanumériques classiques ne constituant pas des tests standards (à cause de la diversité des fontes, des caractères entre eux et aussi parce que leur perception est soumise à des processus cognitifs plus complexes), il est préférable d'utiliser des tests plus déterminés tels que l'anneau de Landolt ou le crochet de Snellen.

Anneau de Landolt:

Il s'agit d'un anneau brisé. Le sujet doit reconnaître dans quelle direction se trouve la brisure.

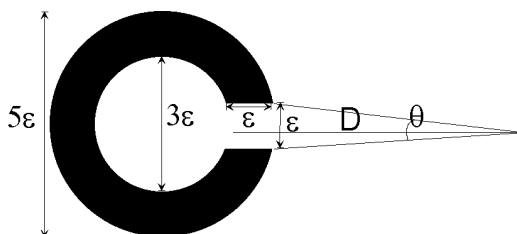


Figure A-5 . Description schématique de l'anneau de Landolt. D = distance œil – test, □ = taille de la brisure (le grand diamètre de l'anneau vaut 5 fois la taille de la brisure et le petit diamètre vaut 3 fois), θ = angle correspondant à la brisure.

Quelle que soit l'orientation de la brisure, l'anneau de Landolt est parfaitement symétrique, sa forme ne changeant jamais. En particulier, la quantité de lumière qui provient du test ne varie pas. Par contre, si ce test peut être imprimé avec précision, il ne peut pas être présenté correctement sur un écran d'ordinateur. En effet la "pixélisation" de l'écran entraîne une déformation de l'anneau, qui, de surcroît, dépend de sa taille. C'est pourquoi le choix de ce test a été rejeté pour l'expérience.

Crochet de Snellen:

Il s'agit d'un U, orienté selon les 4 directions principales (bas, haut, gauche et droite) ce que doit reconnaître le sujet.

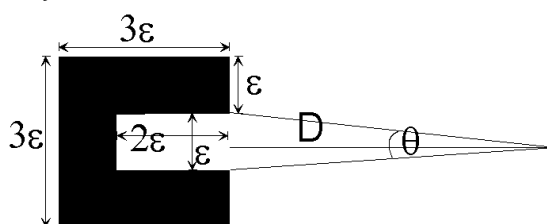


Figure A-6. Description schématique du crochet de Snellen. D = distance œil – test, ε = taille de la brisure (le diamètre du crochet vaut 3 fois la taille de la brisure), θ = angle correspondant à la brisure.

La forme de ce crochet n'est pas du tout affectée par la "pixelisation" de l'écran, c'est pourquoi il a été le test choisi pour l'expérience. Comme pour l'anneau de Landolt, la symétrie est respectée, par contre, le diamètre valant dans ce cas 3 fois la taille de la brisure, le crochet est plus petit que l'anneau pour la même acuité.

A-3.2.2. Champ visuel

Le champ visuel est l'ensemble des points de l'espace réel qu'un sujet peut voir lorsqu'il fixe son regard. On parle ici de champ visuel binoculaire, car pour un seul œil, l'étendue du champ est moindre à cause de la présence du nez. Ces points sont repérés angulairement par les quantités (σ, τ) . L'angle σ correspond à la distance angulaire entre le point à repérer et l'axe du regard. L'angle τ correspond à l'inclinaison par rapport à l'axe vertical (voir figure A-7).

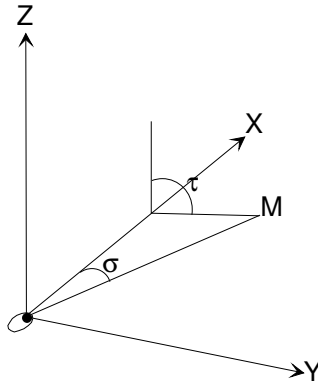


Figure A-7. Définition des angles de repérage du point M dans le champ visuel (σ, τ)

Grâce à son objectif "fish-eye", le photoluminancemètre numérique permet de prendre un champ visuel complet de 180° , or le champ visuel réel des sujets est beaucoup plus petit dans le sens vertical.

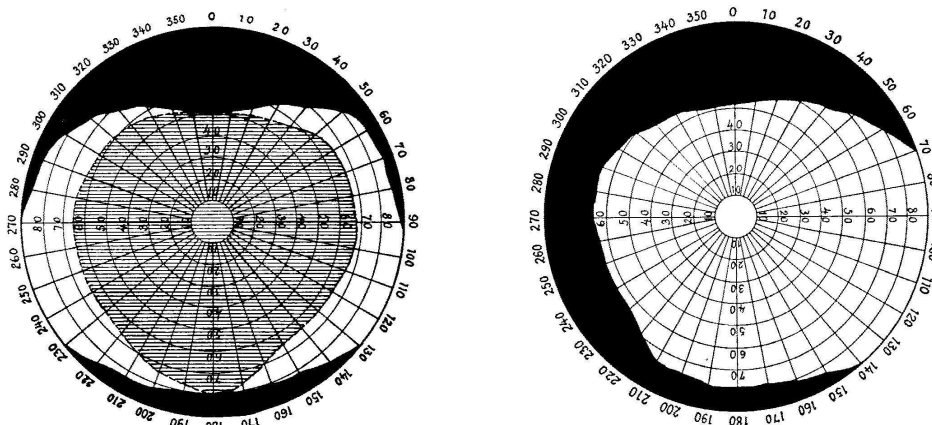


Figure A-8. Représentation schématique du champ visuel réel. Le schéma de gauche correspond au champ binoculaire et celui de droite au champ monoculaire.

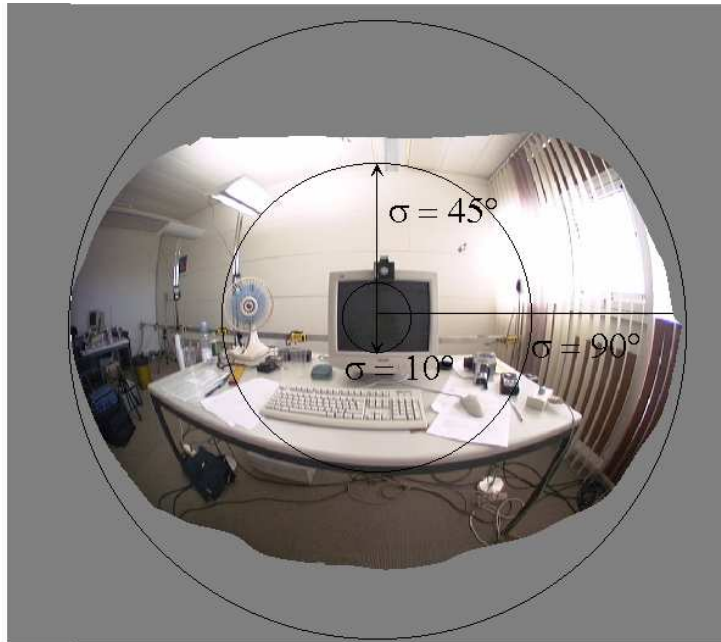


Figure A-9 Champ visuel réel binoculaire d'un sujet, on voit que si dans l'axe horizontal la largeur du champ fait bien 180°, ce n'est pas le cas de l'axe vertical (à cause des paupières et de l'arcade sourcilière).

Ergorama:

Zone du champ visuel entourant l'axe du regard, délimités par l'isoptère de 45° (voir figure A-8), Grandjean recommande un rapport maximum de 3 entre les luminances de cette zone et la luminance de l'écran.

Panorama:

Zone du champ visuel située en dessus de l'isoptère de 45° (voir figure A-8), Grandjean recommande un rapport maximum de 10 entre les luminances de cette zone et la luminance de l'écran.

Tâche ou cible:

Zone du champ visuel constituant le fond sur lequel se détache l'objet que le sujet doit percevoir au cours de son travail. Pour le travail de bureau il s'agit soit de l'écran soit d'une feuille, et les caractères sont les objets que le sujet doit lire.

A-4. Nomenclature des variables

A-4.1. Variables physiologiques

A_{tes} : Acuité mesurée à l'aide du test sur écran en condition standard, luminance écran: 100 cd/m²

A_{te} : Acuité mesurée à l'aide du test sur écran en situation (in-situ)

A_e : Acuité exigée

A : Acuité d'un sujet donné dans une situation lumineuse fixée -> il s'agit de l'acuité qu'il faut modéliser.

V_m : Acuité maximale obtenue au test C45

L_m : Luminance nécessaire pour obtenir l'acuité maximale V_m au test C45

P: pente de la courbe acuité – luminance du test C45

V1: acuité déterminée pour la luminance fixée à 1 cd/m² dans le test C45

θ: facteur mesurant la qualité optique de l'œil, dépend du diamètre pupillaire, de l'âge, et autres facteurs

A-4.2. Variables photométriques

L_t: luminance de la tâche (écran blanc ou document imprimé)

EH: éclairement horizontal, pris sur la table devant l'écran

TH: température de couleur horizontale

EY: éclairement reçu par les yeux, mesuré en fixant le centre de l'écran celui-ci étant éteint

TY: température de couleur verticale

EE: éclairement reçu par l'écran ou un document imprimé

L_{me}: luminance maximum dans l'ergorama (< 45° par rapport à l'axe du regard)

L_{mp}: luminance maximum dans le panorama (> 45° par rapport à l'axe du regard)

L_n: luminance du noir de l'écran éteint

C: contraste entre le caractère et le fond sur lequel il se détache: $C = \frac{L_t - L_n}{L_t}$

I: indice d'hétérogénéité

C_{ec}: Contraste de luminance entre la cible (tâche) et l'environnement. Il s'agit du rapport entre la luminance moyenne du champ visuel et la luminance de la tâche:

$$C_{ec} = \frac{EY}{\pi L_t}$$

L_{EQ}: Luminance d'entourage équivalent que l'on obtient par une moyenne pondérée de la distribution des luminances autour de la tâche

A-4.3. Variables liées à la perception

SL : réponse des sujets à la question sur le sentiment de luminosité de la tâche

SLG : sentiment de luminosité globale de l'ambiance

SFC : sentiment de froideur / chaleur de l'ambiance

SEL: sentiment d'éblouissement provenant des lampes suspendues,

SEG: sentiment d'éblouissement provenant du panneau lumineux à gauche,

SEM: sentiment d'éblouissement provenant du panneau lumineux au milieu,

SED: sentiment d'éblouissement provenant du panneau lumineux à droite,

SE : sentiment d'éblouissement global -> réponse à la question correspondante

SEGS : sentiment d'éblouissement global subjectif, fonction de SEL, SEG, SEM et SED

A-4.4. Probabilités

PM(SL) : probabilité que, dans une situation fixée (caractérisée par la valeur calculée de SL par le modèle de perception), un sujet donné perçoive un manque de lumière au niveau de la tâche.

PE(SL) : probabilité que, dans une situation fixée (caractérisée par la valeur calculée de SL par le modèle de perception), un sujet donné perçoive un excès de lumière au niveau de la tâche.

PS(SL) : probabilité que, dans une situation fixée (caractérisée par la valeur calculée de SL par le modèle de perception), un sujet donné perçoive la tâche comme suffisamment lumineuse.

PET(SL) : probabilité que, dans une situation fixée (caractérisée par la valeur calculée de SEGS par le modèle de perception), un sujet donné perçoive la tâche comme éblouissante.

PEE(SEGS) : probabilité qu'un sujet donné perçoive l'environnement autour de la tâche (caractérisé par la valeur calculée de SEGS par le modèle d'éblouissement), comme éblouissant par rapport à la tâche.

PEG(SEGS) : probabilité qu'un sujet donné perçoive la tâche ou l'environnement comme éblouissant, d'où le nom de probabilité d'éblouissement global.

PMP(A,Ae) : probabilité (de manque de performance visuelle) qu'un sujet donné possède une acuité inférieure à une acuité exigée (Ae), dans des conditions lumineuses fixées. L'estimation de son acuité (A) dans ces conditions a été calculée par le modèle d'acuité.

A-5. Champs visuels présentés au cours de l'expérience, photographies et mesures.

Dans ce paragraphe sont exposés les photographies fish-eye, et les données photométriques des champs visuels proposés aux sujets. En ce qui concerne les 16 situations de l'expérience en laboratoire, les mesures ont été réalisées à l'aide du photoluminancemètre numérique (hormis les températures de couleur et les éclairagements horizontaux). Quant à l'expérience en local prototype, un seul exemple sera présenté pour un sujet avec les quatre situations pour lesquels les mesures ont été réalisées avec des luminancemètres et des luxmètres classiques.

A-5.1. Echelles d'appréciations des données

Quand on donne une valeur mesurée ou calculée d'éclairement, de luminance ou autre, il faut toujours donner une appréciation de sa signification en terme de confort à savoir si, pour le travail sur écran, ces valeurs sont plutôt faibles ou fortes, favorables ou défavorables. Dans cette annexe, nous donnons diverses fourchettes, déterminées suivant les recommandations en vigueur.

A-5.1.1. Eclairage horizontal (EH)

Ces échelles ont été déduites des recommandations (pour le travail sur écran il faut entre 300 et 500 lx) et aussi de la loi logarithmique qui régit la sensation visuelle (il y a un rapport constant entre les éclairagements de passage d'un échelon à l'autre).

$EH \leq 140$ lx	Très faible
$140 < EH \leq 230$ lx	Faible
$230 < EH \leq 300$ lx	Un peu faible
$300 < EH \leq 500$ lx	Bon
$500 < EH \leq 640$ lx	Un peu élevé
$640 < EH \leq 1080$ lx	Elevé
$1080 < EH$	Très élevé

A-5.1.2. Eclairage au niveau des yeux (EY)

Il n'existe pas de recommandations sur ce paramètre. Mais dans les meilleures situations, le rapport entre cet éclairage et l'éclairage horizontal est voisin de $\frac{1}{2}$, d'où les échelles présentées ci-dessous.

$EY \leq 70$ lx	Très faible
$70 < EY \leq 115$ lx	Faible
$115 < EY \leq 150$ lx	Un peu faible
$150 < EY \leq 250$ lx	Bon
$250 < EY \leq 320$ lx	Un peu élevé
$320 < EY \leq 540$ lx	Elevé
$540 < EY$	Très élevé

A-5.1.3. Contraste caractère - écran (C_{EC})

$C_{EC} \leq 0.75$	Mauvais
$0.75 < C_{EC} \leq 0.85$	Médiocre
$0.85 < C_{EC} \leq 0.95$	Moyen
$0.95 < C_{EC}$	Bon

A-5.1.4. Eclairage sur l'écran (EE)

En absence de reflet direct, l'écran renvoie une partie de la lumière incidente (réflexion diffuse). Le facteur de réflexion diffuse d'un écran est de l'ordre de 10%. Les fourchettes ci-dessous sont données en fonction du contraste caractère – écran obtenu pour un écran ayant une luminance de 100cd/m^2 .

$EE \leq 165$ lx	Bon
$165 < EE \leq 550$ lx	Un peu élevé
$550 < EE \leq 1050$ lx	Elevé
$1050 < EE$	Très élevé

A-5.1.5. Luminance maximum dans l'ergorama (L_{me})

Pour cette luminance, nous avons utilisé les recommandations de Grandjean: dans cette zone du champ visuel la luminance ne doit pas dépasser 3 fois la luminance de l'écran (ici un écran de 100cd/m^2), puis nous avons étendu les fourchettes en fonction de la loi logarithmique de sensation visuelle (on a considéré que le rapport 3 correspond à l'échelon "élevé"). Nous avons tenu compte aussi du fait que le fond ne doit pas être non plus trop sombre, ce qui rend l'écran lui-même éblouissant.

$L_{me} \leq 19 \text{ cd/m}^2$	Très faible
$19 < L_{me} \leq 33 \text{ cd/m}^2$	Faible
$33 < L_{me} \leq 59 \text{ cd/m}^2$	Un peu faible
$59 < L_{me} \leq 170 \text{ cd/m}^2$	Bon
$170 < L_{me} \leq 300 \text{ cd/m}^2$	Un peu élevé
$300 < L_{me} \leq 520 \text{ cd/m}^2$	Elevé
$520 < L_{me}$	Très élevé

A-5.1.6. Luminance maximum dans le panorama (L_{mp})

Comme pour la luminance maximum dans l'ergorama, nous avons utilisé les recommandations de Grandjean : dans cette zone du champ visuel la luminance ne doit pas dépasser 10 fois la luminance de l'écran. Puis, nous avons étendu les fourchettes en fonction de la loi logarithmique de sensation visuelle (on a considéré que le rapport 10 correspond à l'échelon "élevé").

$L_{mp} \leq 10 \text{ cd/m}^2$	Très faible
$10 < L_{mp} \leq 32 \text{ cd/m}^2$	Faible
$32 < L_{mp} \leq 100 \text{ cd/m}^2$	Un peu faible
$100 < L_{mp} \leq 320 \text{ cd/m}^2$	Bon
$320 < L_{mp} \leq 1000 \text{ cd/m}^2$	Un peu élevé
$1000 < L_{mp} \leq 3200 \text{ cd/m}^2$	Elevé
$3200 < L_{mp}$	Très élevé

A-5.1.7. Facteur d'hétérogénéité (I)

$I \leq 0.1$	Bonne homogénéité
$0.1 < I \leq 0.3$	Homogénéité moyenne
$0.3 < I \leq 0.5$	Faible homogénéité
$0.5 < I$	Très faible homogénéité

A-5.1.8. Températures de couleurs (horizontale ou verticale)

Ces fourchettes tiennent compte des courbes de Kruithoff en supposant l'éclairage entre 300 et 500 lx.

$TC \leq 2470 \text{ °K}$	Très chaud
$2470 < TC \leq 2690 \text{ °K}$	Chaud
$2690 < TC \leq 3130 \text{ °K}$	Un peu chaud
$3130 < TC \leq 3610 \text{ °K}$	Neutre
$3610 < TC \leq 5820 \text{ °K}$	Un peu froid
$5820 < TC \leq 9160 \text{ °K}$	Froid
$9160 < TC$	Très froid

A-5.2. Expérience en local prototype

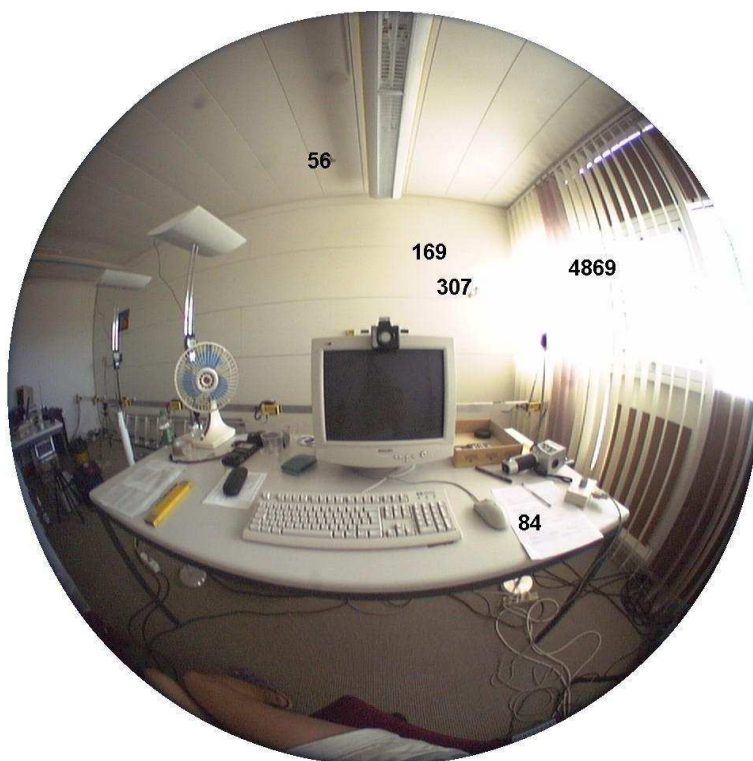
Sont présentés ici quelques mesures photométriques réalisées à l'aide de luxmètres – chromamètres et de luminancemètres classiques. Ne figurent pas le facteur d'hétérogénéité (I) et l'indice UGR, ces deux indices n'étant pas mesurables à l'époque de l'expérience. Les photos présentées sont des exemples illustratifs correspondant aux 4 situations proposées pour un sujet (il y avait pour chaque sujet 1 photo par situation, ce qui fait $4 \times 42=168$ photographies au total). Dans le tableau de données figurent deux chiffres entre crochets pour chaque variable. Ces 2 chiffres correspondent aux valeurs minimum et maximum mesurées pour ces paramètres au cours de l'expérience.

A-5.2.1. Situation LA : lumière artificielle pure



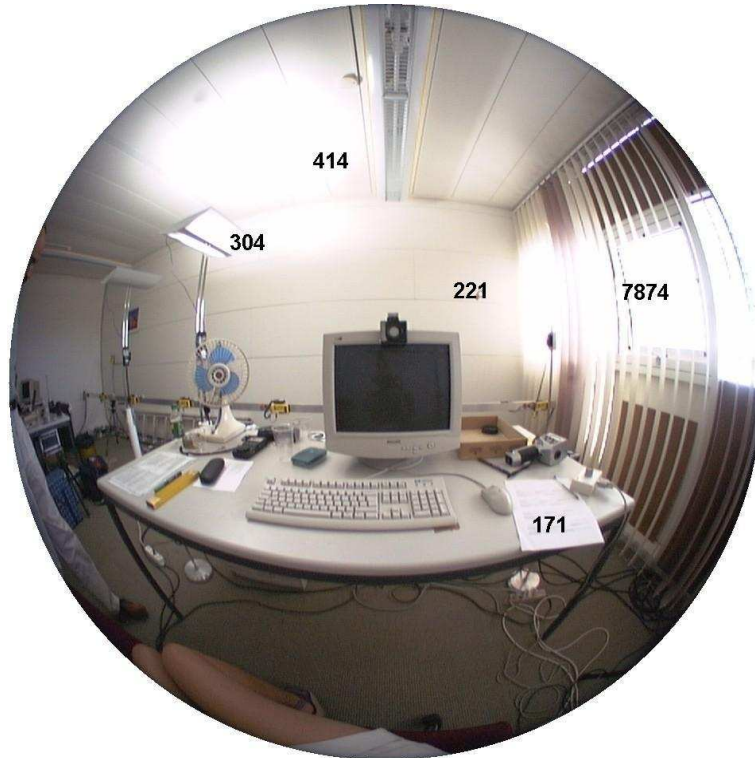
Luminance maximum ergorama (Lme)	[91 – 110] cd/m ²	Bon
Luminance maximum panorama (Lmp)	[9500 – 14000] cd/m ²	Très élevé
Eclairage horizontal (EH)	[285 – 320] lx	Bon
Température de couleur horizontal (TH)	[4000 – 4100] °K	Un peu froid
Eclairage au niveau des yeux (EY)	[154 – 300] lx	Bon
Température de couleur yeux (TY)	[4000 – 4200] °K	Un peu froid
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 100 cd/m ²)	[5.4 – 9.8] %	Bon

A-5.2.2. Situation LN : lumière naturelle pure



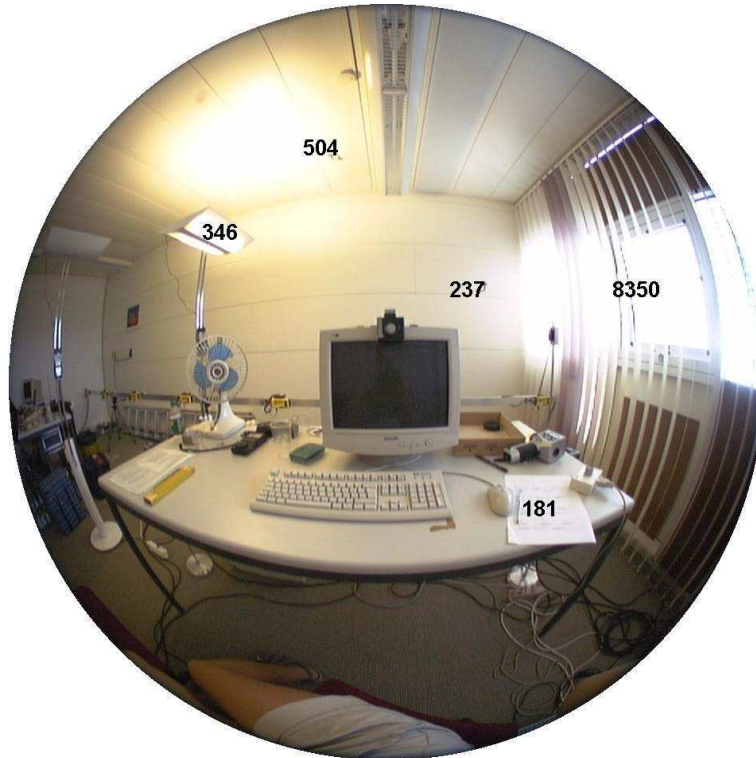
Luminance maximum ergorama (Lme)	[147 - 442] cd/m ²	Bon – élevé
Luminance maximum panorama (Lmp)	[3680 - 12230] cd/m ²	Très élevé
Eclairage horizontal (EH)	[245 - 620] lx	Bon
Température de couleur horizontal (TH)	[4750 - 5350] °K	Un peu froid
Eclairage au niveau des yeux (EY)	[225 - 620] lx	Bon – élevé
Température de couleur yeux (TY)	[5050 - 5850] °K	Un peu froid
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 100 cd/m ²)	[7.2 – 23.9] %	Bon

A-5.2.3. Situation LF : lumière naturelle avec lampe sur pied de couleur froide



Luminance maximum ergorama (Lme)	[186 - 464] cd/m ²	Elevé
Luminance maximum panorama (Lmp)	[3475 - 20870] cd/m ²	Très élevé
Eclairage horizontal (EH)	[395 - 900] lx	Bon – élevé
Température de couleur horizontal (TH)	[4750 - 5350] °K	Un peu froid
Eclairage au niveau des yeux (EY)	[330 - 810] lx	Elevé
Température de couleur yeux (TY)	[4950 - 5650] °K	Un peu froid
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 100 cd/m ²)	[9.0 – 39.7] %	Bon - moyen

A-5.2.4. Situation LC : lumière naturelle avec lampe sur pied de couleur chaude



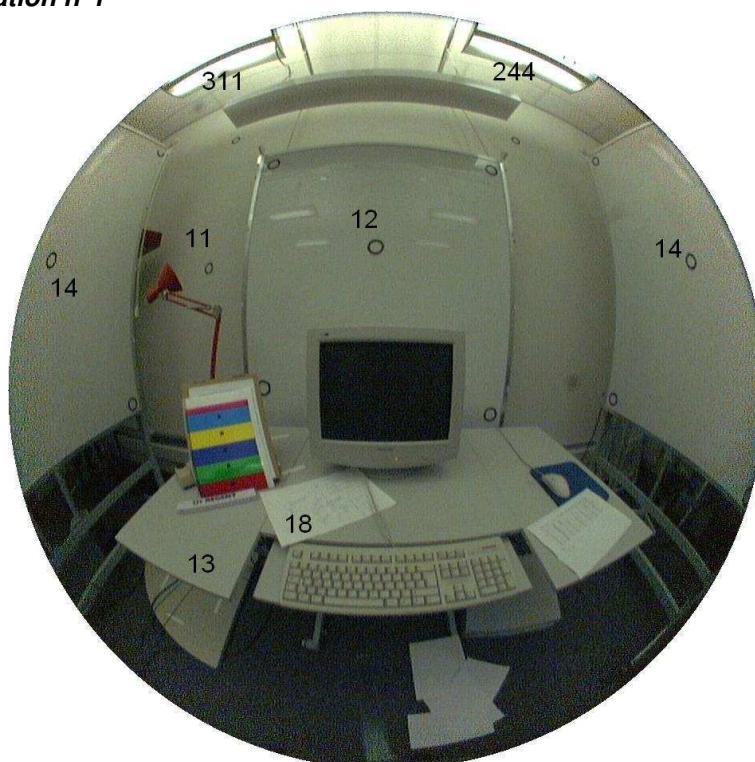
Luminance maximum ergorama (Lme)	[195 - 624] cd/m ²	Elevé
Luminance maximum panorama (Lmp)	[3215 - 81111] cd/m ²	Très élevé
Eclairage horizontal (EH)	[430 - 1040] lx	Bon – élevé
Température de couleur horizontal (TH)	[3800 - 5050] °K	Un peu froid
Eclairage au niveau des yeux (EY)	[400 - 815] lx	Très - élevé
Température de couleur yeux (TY)	[4100 - 5600] °K	Un peu froid
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 100 cd/m ²)	[11.0 - 40.6] %	Bon - moyen

A-5.3. Expérience en laboratoire (les 16 situations)

Il faut rappeler que les photographies des champs visuel présentées dans ce chapitre ne donnent pas la sensation visuelle réelle. Ceci d'autant que sur les 7 photographies, nécessaires pour l'évaluation des luminances (voir méthode), l'image choisie pour illustrer la situation est celle qui permet une meilleure vision des détails du champ visuel (donc ni la plus saturée, ni la plus sombre). Il en résulte que certaines photographies peuvent paraître plus sombres que d'autres alors que c'était l'inverse dans la réalité.

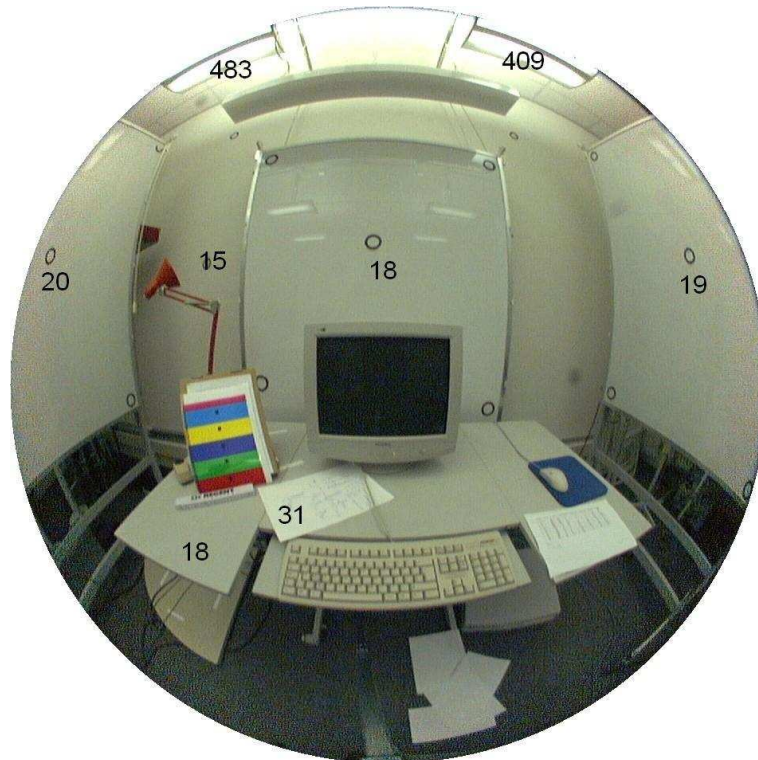
Dans les tableaux de données, nous donnons aussi les valeurs de réglages des diverses sources de lumière. PG correspond au réglage du panneau gauche, PM au réglage du panneau du milieu, PD au réglage du panneau à droite, LSG au réglage des lampes suspendues de gauche et enfin LSD au réglage des lampes suspendues de droite.

A-5.3.1 Situation n°1



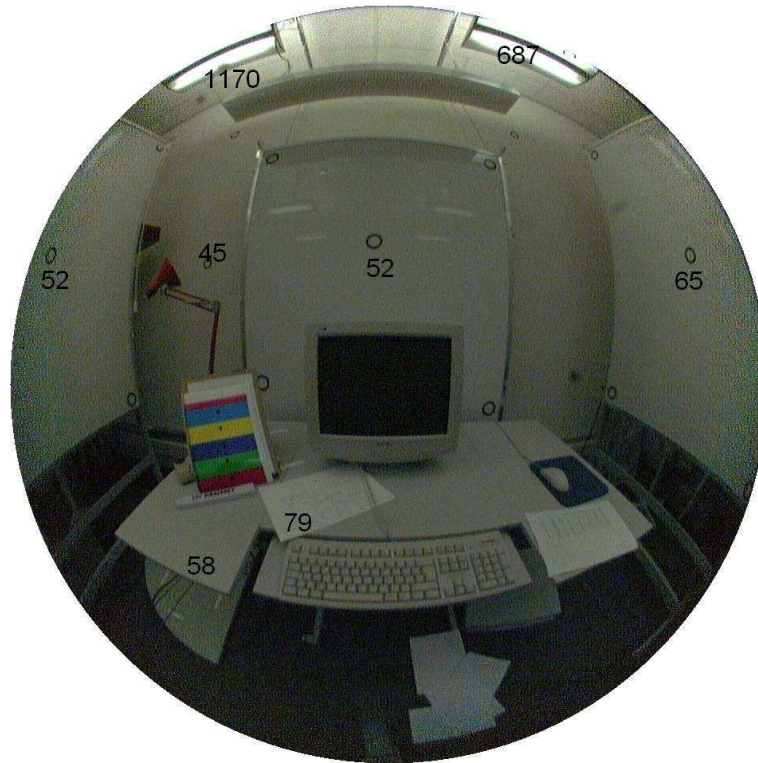
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	0	PM	0	PD	0	LSG	33	LSD	28
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						75 lx	Très faible		
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						81 lx	Très faible		
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						77 lx	Très faible		
Eclairage reçu par les yeux (EY)						35 lx	Très faible		
Eclairage reçu par l'écran						46 lx	Bon		
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						18 cd/m ²	Très faible		
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						311 cd/m ²	Bon		
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.017	Bonne homogénéité		
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						41.1%	Moyen		
Indice UGR						-66.1	Pas éblouissant		

A-5.3.2. Situation n°2



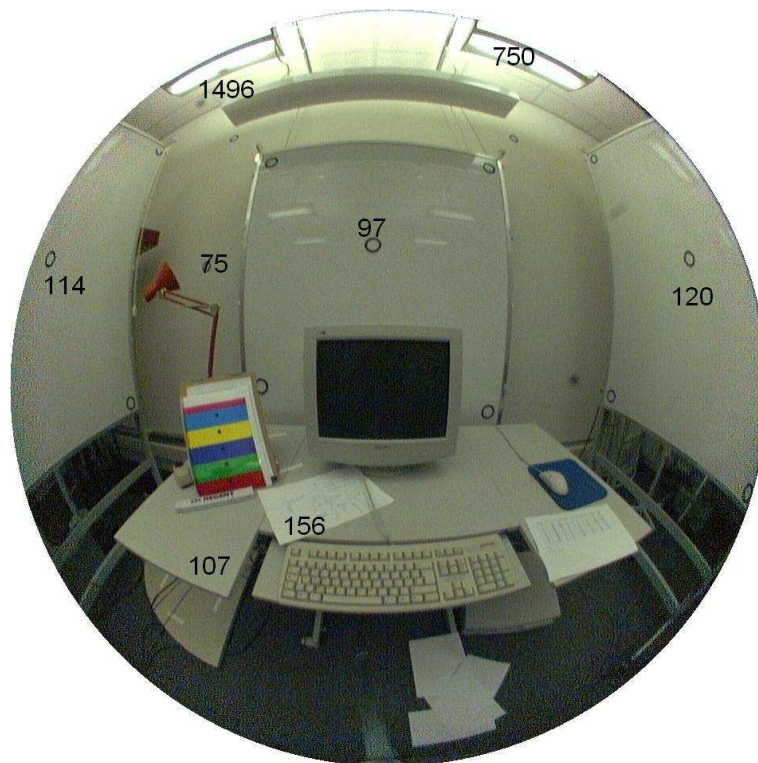
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	0	PM	0	PD	0	LSG	55	LSD	47
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						122 lx		Très faible	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						128 lx		Très faible	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						122 lx		Très faible	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						48 lx		Très faible	
Eclairage reçu par l'écran						72 lx		Bon	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						31 cd/m ²		faible	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						483 cd/m ²		Un peu élevé	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.021		Bonne homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						29.3 %		Moyen	
Indice UGR						-64		Pas éblouissant	

A-5.3.3. Situation n°3



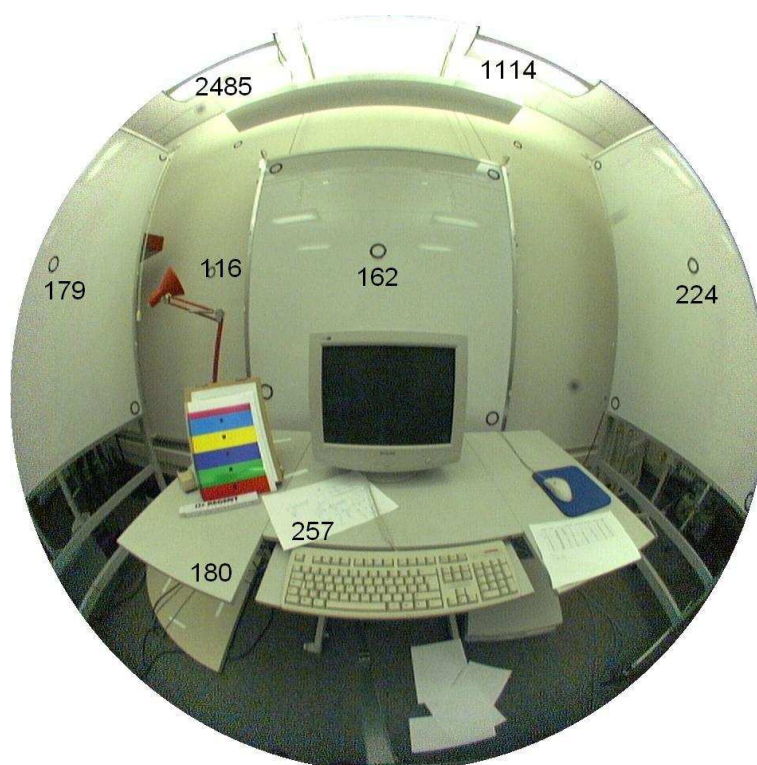
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	0	PM	0	PD	0	LSG	165	LSD	141
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						349 lx		Bon	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						351 lx		Bon	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						347 lx		Bon	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						139 lx		Un peu faible	
Eclairage reçu par l'écran						198 lx		Un peu élevé	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						79 cd/m ²		Bon	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						1170 cd/m ²		Elevé	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.020		Bonne homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						11.0 %		Bon	
Indice UGR						-59.8		Pas éblouissant	

A-5.3.4. Situation n°4



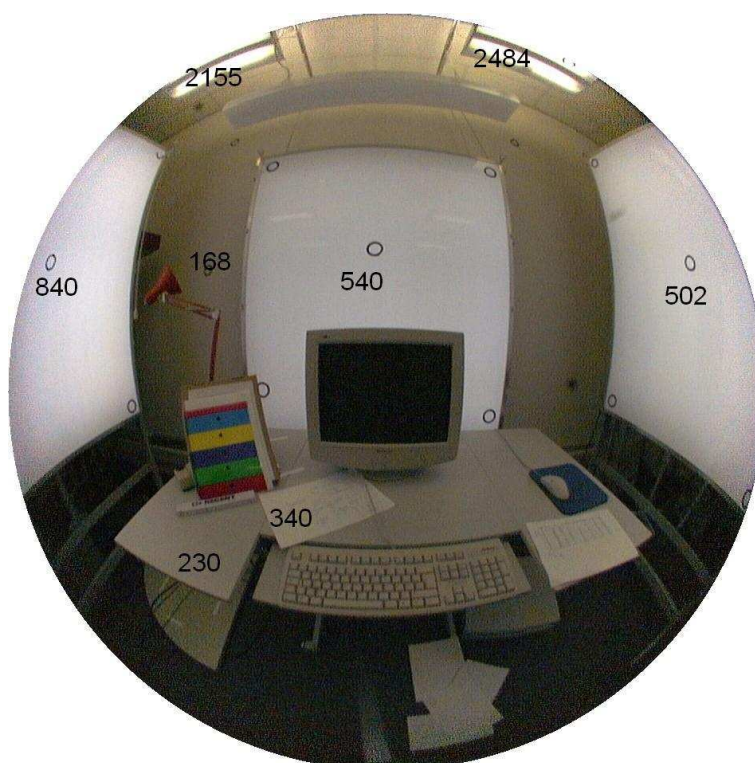
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	0	PM	0	PD	0	LSG	330	LSD	281
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						692 lx		Elevé	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						686 lx		Elevé	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						681 lx		Elevé	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						263 lx		Un peu élevé	
Eclairage reçu par l'écran						404 lx		Un peu élevé	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						156 cd/m ²		Bon	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						1496 cd/m ²		Elevé	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.020		Bonne homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						7.9 %		Bon	
Indice UGR						-58.3		Pas éblouissant	

A-5.3.5. Situation n°5



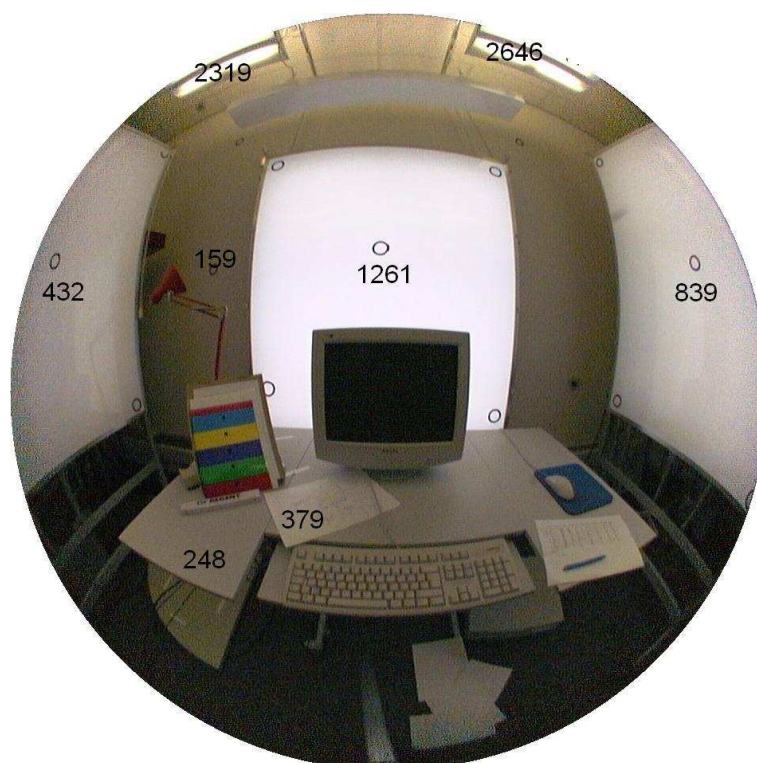
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	0	PM	0	PD	0	LSG	550	LSD	469
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						1133 lx		Très élevé	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						1119 lx		Très élevé	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						1117 lx		Très élevé	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						433 lx		Elevé	
Eclairage reçu par l'écran						661 lx		Elevé	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						257 cd/m ²		Un peu élevé	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						2485 cd/m ²		Elevé	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.018		Bonne homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						12.9 %		Bon	
Indice UGR						-57.3		Pas éblouissant	

A-5.3.6. Situation n°6



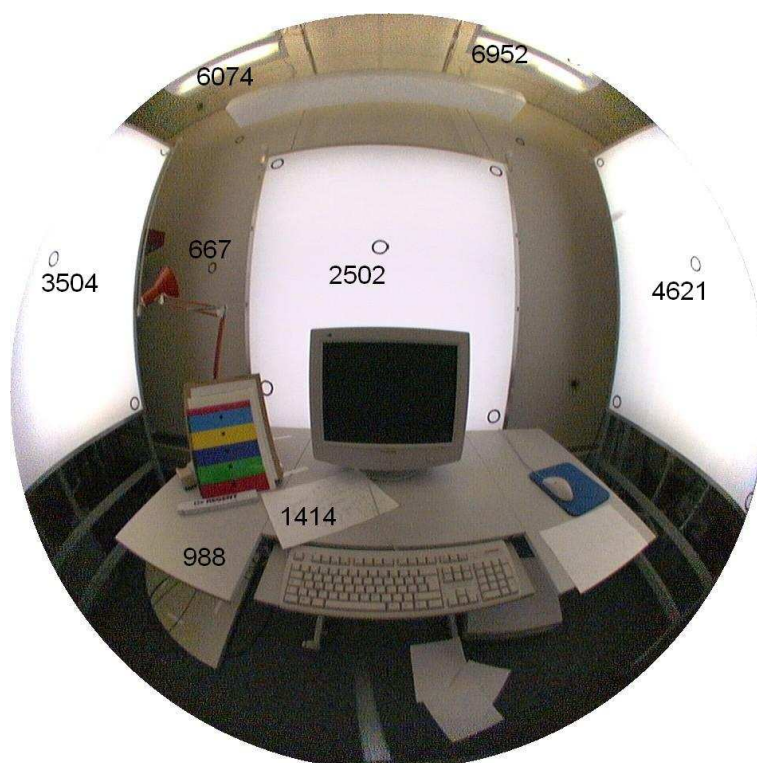
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	165	PM	19	PD	100	LSG	400	LSD	400
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						1303 lx	Très élevé		
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						1202 lx	Très élevé		
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						1290 lx	Très élevé		
Eclairage reçu par les yeux (EY)						886 lx	Très élevé		
Eclairage reçu par l'écran						715 lx	Elevé		
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						540 cd/m ²	Très élevé		
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						2484 cd/m ²	Elevé		
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.292	Homogénéité moyenne		
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						29.2 %	Moyen		
Indice UGR						25.7	Pas éblouissant		

A-5.3.7. Situation n°7



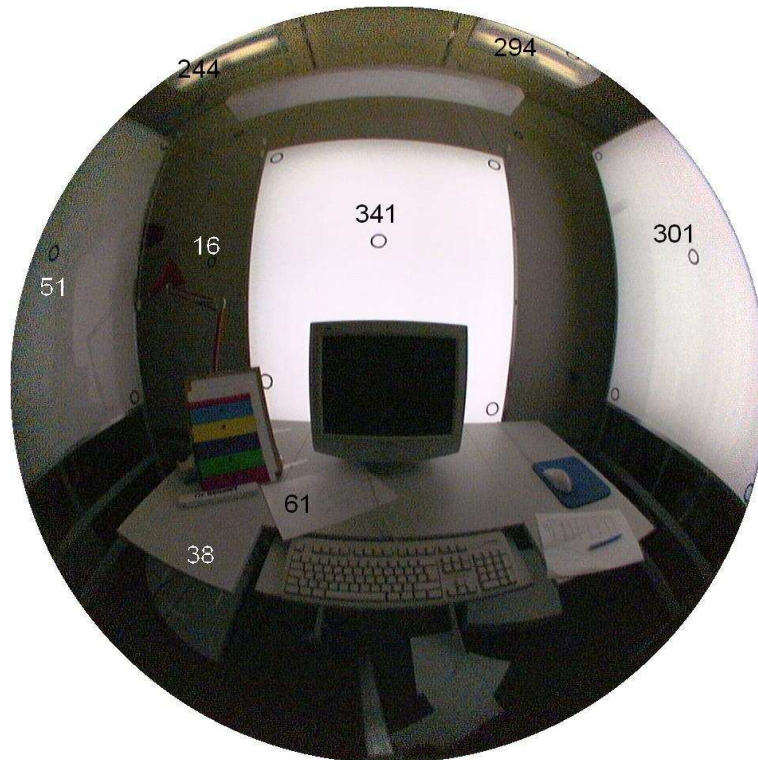
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	2	M	79	D	0	SG	00	SD	00
Éclairage horizontal, à gauche de l'écran						349 lx	très élevé		
Éclairage horizontal devant l'écran (EH)						203 lx	très élevé		
Éclairage horizontal, à droite de l'écran						402 lx	très élevé		
Éclairage reçu par les yeux (EY)						163 lx	très élevé		
Éclairage reçu par l'écran						84 lx	Élevé		
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						261 cd/m ²	très élevé		
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						646 cd/m ²	Élevé		
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.366	faible homogénéité		
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						0.0 %	Médiocre		
Indice UGR						0.4	éblouissant		

A-5.3.8. Situation n°8



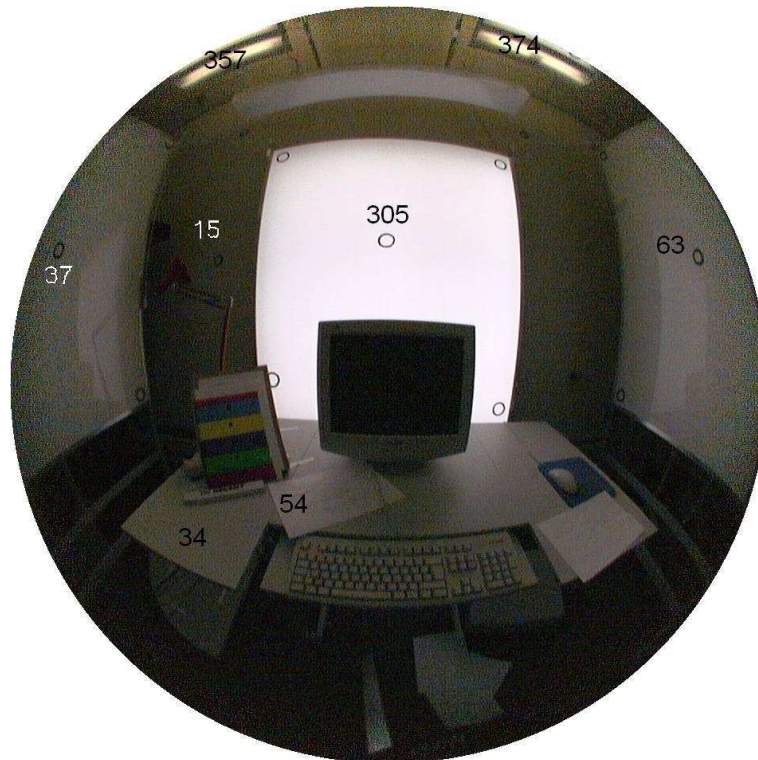
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)			
PG	PM	PD	SG
83	85	00	00
Éclairage horizontal, à gauche de l'écran		120 lx	Très élevé
Éclairage horizontal devant l'écran (EH)		370 lx	Très élevé
Éclairage horizontal, à droite de l'écran		140 lx	Très élevé
Éclairage reçu par les yeux (EY)		745 lx	Très élevé
Éclairage reçu par l'écran		511 lx	Très élevé
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)		502 cd/m ²	Très élevé
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)		952 cd/m ²	Très élevé
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)		0.326	Faible homogénéité
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)		00 %	Mauvais
Indice UGR		1.9	Éblouissant

A-5.3.9. Situation n°9



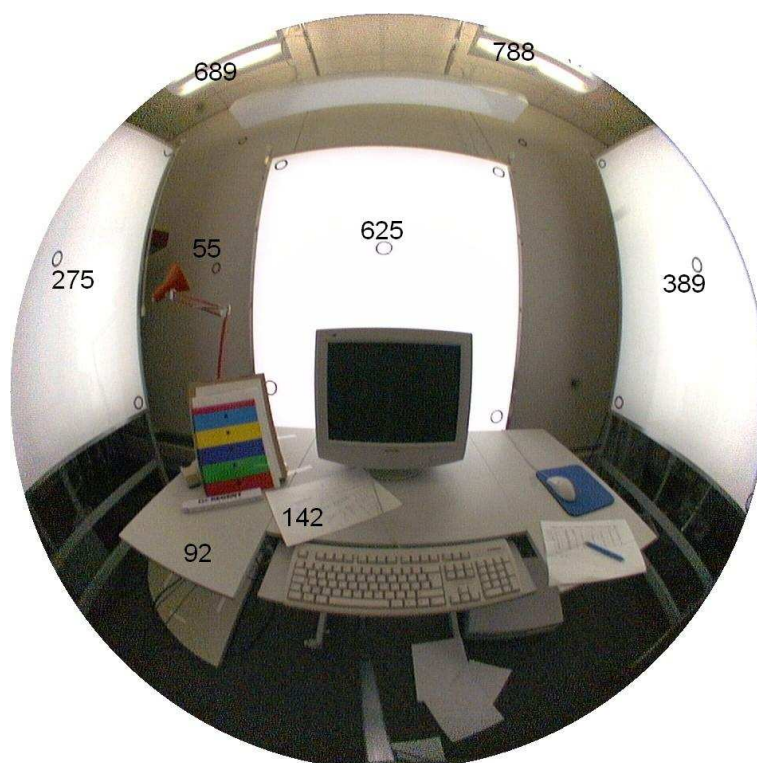
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	0	PM	46	PD	0	LSG	20	LSD	20
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						103 lx		Très faible	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						94 lx		Très faible	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						110 lx		Très faible	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						274 lx		Un peu élevé	
Eclairage reçu par l'écran						44 lx		Bon	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						341 cd/m ²		Elevé	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						301 cd/m ²		Bon	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.382		Faible homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						9.9 %		Bon	
Indice UGR						25.1		éblouissant	

A-5.3.10. Situation n°10



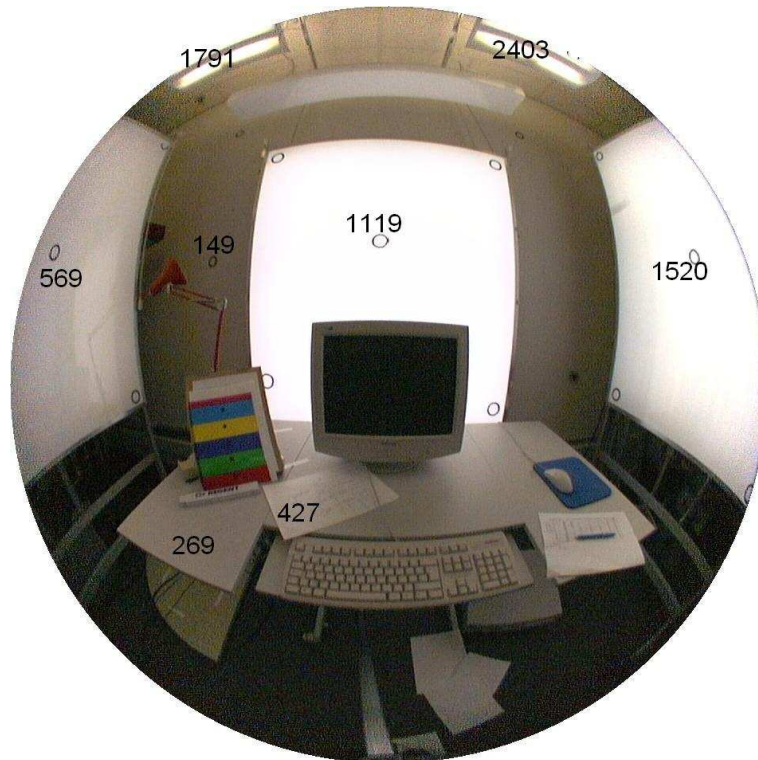
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	0	PM	76	PD	0	LSG	33	LSD	33
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						169 lx		Faible	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						139 lx		Très faible	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						172 lx		Faible	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						210 lx		Bon	
Eclairage reçu par l'écran						71 lx		Bon	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						305 cd/m ²		Elevé	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						374 cd/m ²		Bon	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.459		Faible homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						7.0 %		Bon	
Indice UGR						25.4		éblouissant	

A-5.3.11. Situation n°11



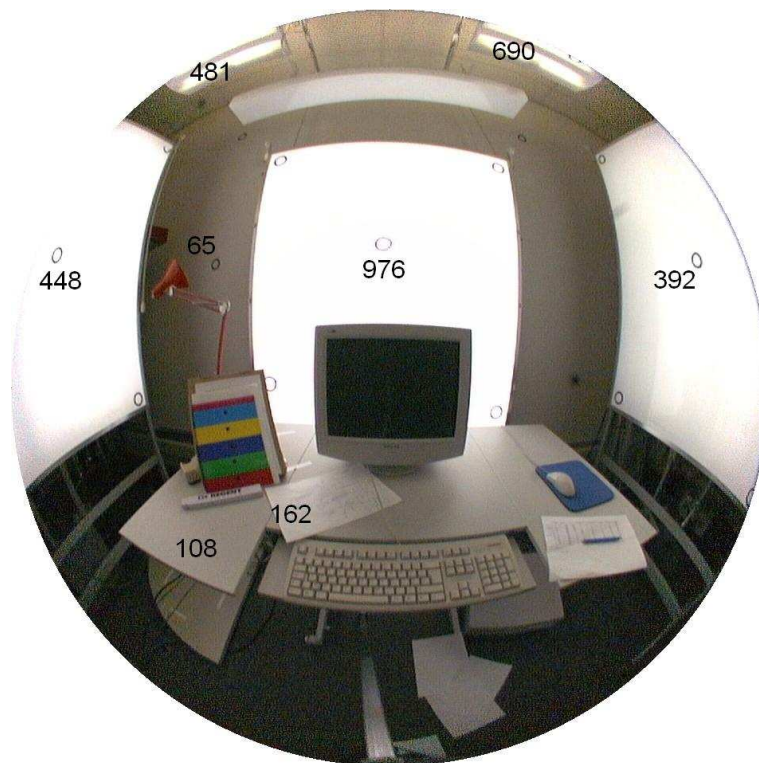
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	34	PM	145	PD	40	LSG	90	LSD	90
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						501 lx		Un peu élevé	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						419 lx		Bon	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						523 lx		Un peu élevé	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						526 lx		Elevé	
Eclairage reçu par l'écran						229 lx		Un peu élevé	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						625 cd/m ²		Très élevé	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						788 cd/m ²		Un peu élevé	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.426		Faible homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						15.9 %		Bon	
Indice UGR						28.9		éblouissant	

A-5.3.12. Situation n°12



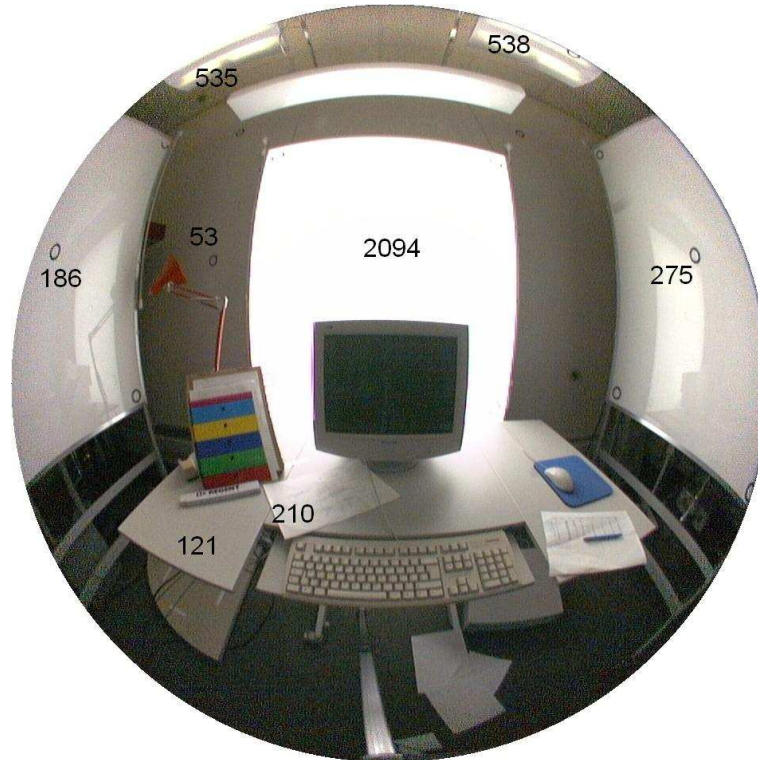
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	47	PM	479	PD	200	LSG	300	LSD	300
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						1488 lx		Très élevé	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						1262 lx		Très élevé	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						1654 lx		Très élevé	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						1723 lx		Très élevé	
Eclairage reçu par l'écran						691 lx		Elevé	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						1119 cd/m ²		Très élevé	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						2403 cd/m ²		Elevé	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.453		Faible homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						89.1 %		Mauvais	
Indice UGR						33.6		éblouissant	

A-5.3.13. Situation n°13



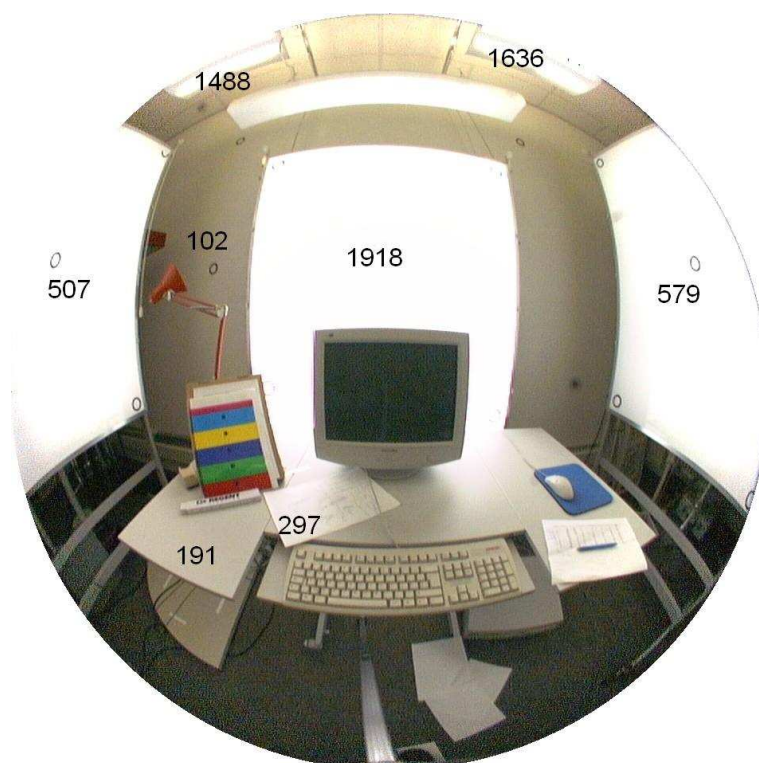
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	84	PM	207	PD	30	LSG	60	LSD	60
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						576 lx		Un peu élevé	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						435 lx		Bon	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						542 lx		Un peu élevé	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						679 lx		Très élevé	
Eclairage reçu par l'écran						235 lx		Un peu élevé	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						976 cd/m ²		Très élevé	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						690 cd/m ²		Un peu élevé	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.474		Faible homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						26.0 %		Moyen	
Indice UGR						31.0		éblouissant	

A-5.3.14. Situation n°14



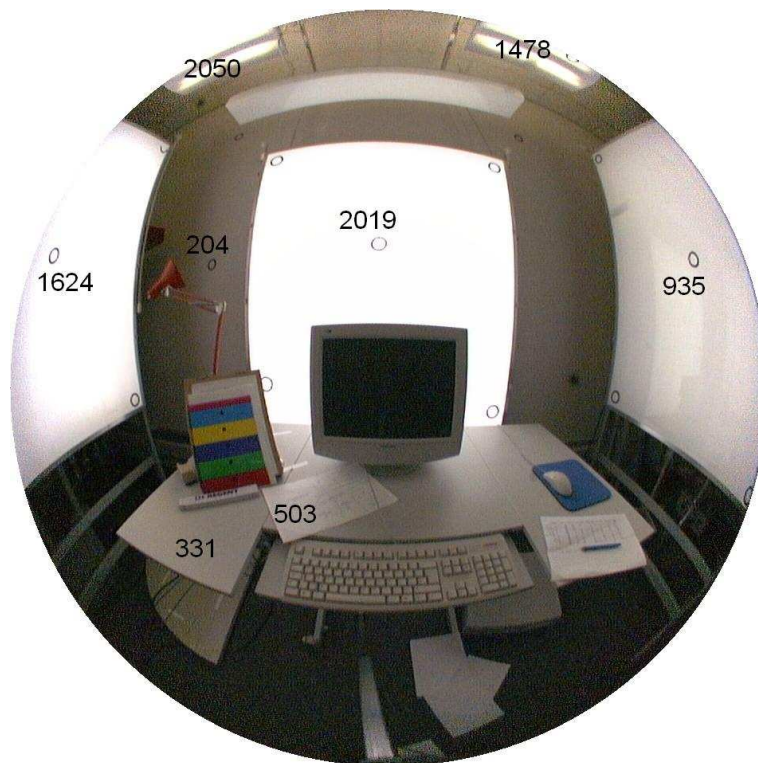
Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)									
PG	0	PM	505	PD	0	LSG	36	LSD	36
Eclairage horizontal, à gauche de l'écran						654 lx		Un peu élevé	
Eclairage horizontal devant l'écran (EH)						412 lx		Bon	
Eclairage horizontal, à droite de l'écran						649 lx		Un peu élevé	
Eclairage reçu par les yeux (EY)						1167 lx		Très élevé	
Eclairage reçu par l'écran						189 lx		Un peu élevé	
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						2094 cd/m ²		Très élevé	
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						538 cd/m ²		Un peu élevé	
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.596		Très faible homogénéité	
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						65.8 %		Médiocre	
Indice UGR						33.8		éblouissant	

A-5.3.15. Situation n°15



Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)										
PG	3	M	35	D	0	SG	60	SD	60	
Éclairage horizontal, à gauche de l'écran						025 lx	Élevé			
Éclairage horizontal devant l'écran (EH)						74 lx	Élevé			
Éclairage horizontal, à droite de l'écran						014 lx	Élevé			
Éclairage reçu par les yeux (EY)						278 lx	Très élevé			
Éclairage reçu par l'écran						25 lx	Un peu élevé			
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						918 cd/m ²	Très élevé			
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						636 cd/m ²	Élevé			
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						1.486	Faible homogénéité			
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						9.1 %	Médiocre			
Indice UGR						4.1	Éblouissant			

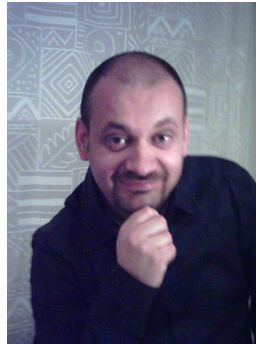
A-5.3.16. Situation n°16



Réglages des différentes sources de lumière disponibles (graduation allant de 0 à 1000)										
	290	PM	689	PD	90	LSG	200	LSD	200	
Eclairement horizontal, à gauche de l'écran						1804 lx	Très élevé			
Eclairement horizontal devant l'écran (EH)						1290 lx	Très élevé			
Eclairement horizontal, à droite de l'écran						1627 lx	Très élevé			
Eclairement reçu par les yeux (EY)						1837 lx	Très élevé			
Eclairement reçu par l'écran						705 lx	Elevé			
Luminance maximale dans l'ergorama (Lme)						2019 cd/m ²	Très élevé			
Luminance maximale dans le panorama (Lmp)						2050 cd/m ²	Elevé			
Indice d'hétérogénéité (définition 2) (I)						0.443	Faible homogénéité			
Indice PIP de confort visuel (pour luminance de l'écran de 120 cd/m ²)						100 %	Mauvais			
Indice UGR						33.3	éblouissant			

CURRICULUM VITAE

Nom : Francioli
Prénoms : David, valentin, mario
Date naissance : 22-11-1966
Permis C, célibataire.



Etudes :

- juin 1984 bac série C (mathématiques, physique chimie),
- 1984-1990 études de physique nucléaire et corpusculaire à l'université de Genève sanctionnées d'un diplôme;
- 17-08-1990 obtention du diplôme,

Parcours professionnel :

- 1990-1994 assistant physicien au laboratoire d'ergonomie de la vision (LEV), section de l'unité de médecine du travail et d'ergonomie (UMTE) à l'université de Genève, engagé dans le cadre de la recherche LUMEN (réf. [1]);
- 1994 obtention du prix des services industriels de Genève (SIG) pour le travail portant sur l'indice d'inconfort visuel;
- depuis 1994 le LEV a été incorporé à l'institut universitaire romand de santé au travail (IURST) basé à Lausanne;
- 1997 prix section suisse du club européen de la santé;
- 1999 - 2003 doctorant à l'IST:

Travail à l'IST:

- recherche sur les indicateurs visuels pour l'ergonomie;
- prestation de service: mandats privés et publics en ergonomie pour l'aménagement de postes;
- développement d'outils: test visuel sur écran, test visuel sur table lumineuse, questionnaires informatisés, photoluminancemètre numérique (mesures de luminances à l'aide d'un appareil photographique numérique), diverses méthodes d'analyses du champ visuel;
- Aide à l'enseignement en ergonomie (travaux pratiques et cours)
- 1999 –2000: correspondant informatique de l'IST.
- Collaboration avec le LESO (Laboratoire d'Energie SOlaire) à l'EPFL, participation à différents projets communs (réf. [9], [17], [19])
- Participation à une recherche avec l'université de Genève (réf. [14])

Sociétés: 1996 Société française d'optique physiologique.
1998 Section suisse du club européen de la santé.
1999 Société suisse d'ergonomie (membre fondateur)

Compétences diverses:

programmation informatique (développement de logiciels), langages visual basic, Delphi, visual C++,
statistiques

Langues:

Français (langue maternelle), italien (parlé, lu), anglais (lu)

Divers:

Sports: tennis de table, ski alpin, randonnées en montagne, vélo course et VTT
Président d'une association sportive de 1991 à 1998

Intérêts: histoire, informatique, lecture