

# Etude analytique et experimentale du pilotage de stores vénitiens en vue d'obtenir des conditions de confort visuel optimales dans le cas du travail sur écran de visualisation

Yannick Sutter

## ▶ To cite this version:

Yannick Sutter. Etude analytique et experimentale du pilotage de stores vénitiens en vue d'obtenir des conditions de confort visuel optimales dans le cas du travail sur écran de visualisation. Automatique / Robotique. INSA Lyon, 2003. Français. NNT: . tel-02472529

HAL Id: tel-02472529 https://hal.science/tel-02472529

Submitted on 10 Feb 2020

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

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

#### Thèse

# Etude analytique et experimentale du pilotage de stores vénitiens en vue d'obtenir des conditions de confort visuel optimales dans le cas du travail sur écran de visualisation

Présentée devant L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

> Pour obtenir Le grade de docteur

Formation doctorale : Génie Civil École doctorale : M.E.G.A.

## Par

#### Yannick SUTTER

Soutenue le 20 juin 2003 devant la Commission d'examen

#### Jury MM.

Directeur de thèse Prof. Marc FONTOYNONT

Rapporteur Prof. Mike WILSON
Rapporteur Prof. Gilbert ACHARD
Examinateur Prof. Jean-Jacques ROUX
Examinateur M. Jean-Pierre PEILLON
Examinateur Dr. Dominique DUMORTIER

Invité M. Eric CHERON

Laboratoire des Sciences de l'Habitat. DGCB – URA CNRS 1652 Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat - 2, rue Maurice Audin 69518 Vaulx-en-Velin

# Ecoles Doctorales et Diplômes d'Etudes Approfondies

habilités pour la période 1999-2003

|   | 114011110  | s pour la periode                                | 1999 2000   |  |
|---|--|--|---|--|
| 1<br>2 ECOLES DOCTORALES<br>n° code national                                    | RESPONSABLE<br>PRINCIPAL   | 4 CORRESPONDANT<br>INSA                          | DEA INSA<br>n° code national  | RESPONSABLE<br>DEA INSA  |
| 4.1 4.2 CHIMIE DE LYON (Chimie, Procédés, Environnement) 4.2.1 EDA206           | M. D. SINOU<br>UCBL1<br>04.72.44.62.63<br>Sec 04.72.44.62.64<br>Fax 04.72.44.81.60         | M. R. GOURDON<br>87.53<br>Sec 84.30<br>Fax 87.17 | Chimie Inorganique 910643 Sciences et Stratégies Analytiques 910634 Sciences et Techniques du Déchet 910675   | M. R. GOURDON<br>Tél 87.53 Fax 87.17   |
| ECONOMIE, ESPACE ET MODELISATION DES COMPORTEMENTS (E <sup>2</sup> MC) 5 EDA417 | M.A. BONNAFOUS<br>LYON 2<br>04.72.72.64.38<br>Sec 04.72.72.64.03<br>Fax 04.72.72.64.48     | Mme M. ZIMMERMANN<br>84.71<br>Fax 87.96          | Villes et Sociétés 911218  Dimensions Cognitives et Modélisation 992678   | Mme M. ZIMMERMANN Tél 84.71 Fax 87.96 M. L. FRECON Tél 82.39 Fax 85.18   |
| ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE (E.E.A.) 5.1.1 EDA160               | M. G. GIMENEZ<br>INSA DE LYON<br>83.32<br>Fax 85.26  |  | Automatique Industrielle 910676  Dispositifs de l'Electronique Intégrée 910696  Génie Electrique de Lyon 910065  Images et Systèmes 992254  | M. M. BETEMPS Tél 85.59 Fax 85.35 M. D. BARBIER Tél 85.47 Fax 60.81 M. J.P. CHANTE Tél 87.26 Fax 85.30 Mme I. MAGNIN Tél 85.63 Fax 85.26 |
| EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION  (E2M2) 5.1.2 EDA403         | M. J.P<br>FLANDROIS<br>UCBL1<br>04.78.86.31.50<br>Sec 04.78.86.31.52<br>Fax 04.78.86.31.49 | M. S. GRENIER<br>79.88<br>Fax 85.34              | Analyse et Modélisation des Systèmes<br>Biologiques<br>910509   | M. S. GRENIER<br>Tél 79.88 Fax 85.34   |
| INFORMATIQUE ET INFORMATION POUR LA SOCIETE (EDIIS)  5.1.3 EDA 407              | M. J.M. JOLION<br>INSA DE LYON<br>87.59<br>Fax 80.97                                       |  | Documents Multimédia, Images et Systèmes d'Information Communicants 992774  Extraction des Connaissances à partir des Données 992099  Informatique et Systèmes Coopératifs pour l'Entreprise 950131 | M. A. FLORY Tél 84.66 Fax 85.97  M. J.F. BOULICAUT Tél 89.05 Fax 87.13  M. A. GUINET Tél 85.94 Fax 85.38                                 |
| INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE  (EDISS) 5.1.4 EDA205                         | M. A.J. COZZONE<br>UCBL1<br>04.72.72.26.72<br>Sec 04.72.72.26.75<br>Fax 04.72.72.26.01     | M. M. LAGARDE<br>82.40<br>Fax 85.24              | Biochimie 930032  | M. M. LAGARDE<br>Tél 82.40 Fax 85.24   |
| 5.2 5.3 MATERIAUX DE LYON 6 UNIVERSITE LYON 1 6.1.1 EDA 034                     | M. J. JOSEPH<br>ECL<br>04.72.18.62.44<br>Sec 04.72.18.62.51<br>Fax 04.72.18.60.90          | M. J.M. PELLETIER<br>83.18<br>Fax 84.29          | Génie des Matériaux : Microstructure, Comportement Mécanique, Durabilité 910527 Matériaux Polymères et Composites 910607 Matière Condensée, Surfaces et Interfaces 910577                           | M. J.M.PELLETIER Tél 83.18 Fax 85.28 M. H. SAUTEREAU Tél 81.78 Fax 85.27 M. G. GUILLOT Tél 81.61 Fax 85.33                               |
| MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE FONDAMENTALE  7 (Math IF) EDA 409                 | M. NICOLAS<br>UCBL1<br>04.72.44.83.11<br>Fax 04.72.43.00.35                                | M. J. POUSIN<br>88.36<br>Fax 85.29               | Analyse Numérique, Equations aux dérivées partielles et Calcul Scientifique 910281  | M. G. BAYADA<br>Tél 83.12 Fax 85.29  |
| MECANIOUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE (MEGA) 7.1.1 EDA162             | M. J. BATAILLE<br>ECL<br>04.72.18.61.56<br>Sec 04.72.18.61.60<br>Fax 04.78.64.71.45        | M. G.DALMAZ<br>83.03<br>Fax 04.72.89.09.80       | Acoustique 910016  Génie Civil 992610  Génie Mécanique 992111  Thermique et Energétique 910018  | M. J.L. GUYADER Tél 80.80 Fax 87.12  M. J.J.ROUX Tél 84.60 Fax 85.22  M. G. DALMAZ Tél 83.03 Fax 04.78.89.09.80  M. J. F. SACADURA       |

En grisé : Les Ecoles doctorales et DEA dont l'INSA est établissement principal

#### **MARS 2002**

#### 8 INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

Directeur: STORCK.A

Professeurs:

AUDISIO S. PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE

BABOT D. CONT. NON DESTR. PAR RAYONNEMENT IONISANTS

BABOUX J.C. GEMPPM\*\*

**BALLAND B.** PHYSIQUE DE LA MATIERE

BAPTISTE P. PRODUCTIQUE ET INFORMATIQUE DES SYSTEMES MANUFACTURIERS

**BARBIER D.** PHYSIQUE DE LA MATIERE

BASTIDE J.P. LAEPSI\*\*\*\*

BAYADA G. MODELISATION MATHEMATIQUE ET CALCUL SCIENTIFIQUE

BENADDA B. LAEPSI\*\*\*\*

BETEMPS M. AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE

BIENNIER F. PRODUCTIQUE ET INFORMATIQUE DES SYSTEMES MANUFACTURIERS

BLANCHARD J.M. LAEPSI\*\*\*\*
ROISSON C VIRRATIONS.

BOISSON C. VIBRATIONS-ACOUSTIQUE BOIVIN M. (Prof. émérite) MECANIQUE DES SOLIDES

BOTTA H. UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Développement Urbain BOTTA-ZIMMERMANN M. (Mme) UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Développement Urbain

BOULAYE G. (Prof. émérite) INFORMATIQUE

BOYER J.C. MECANIQUE DES SOLIDES

BRAU J. CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Thermique du bâtiment

**BREMOND G.** PHYSIQUE DE LA MATIERE

BRISSAUD M. GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE

BRUNET M. MECANIQUE DES SOLIDES

BRUNIE L. INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION

BUREAU J.C. CEGELY\*
CAVAILLE J.Y. GEMPPM\*\*\*

CHANTE J.P. CEGELY\*- Composants de puissance et applications

CHOCAT B. UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Hydrologie urbaine

**COMBESCURE A.** MECANIQUE DES CONTACTS

COUSIN M. UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Structures

DAUMAS F. (Mme)CETHIL – Energétique et ThermiqueDOUTHEAU A.CHIMIE ORGANIQUEDUFOUR R.MECANIQUE DES STRUCTURES

DUPUY J.C. PHYSIQUE DE LA MATIERE
EMPTOZ H. RECONNAISSANCE DES FORMES ET VISION

ESNOUF C. GEMPPM\*\*\*

**EYRAUD L.** (Prof. émérite) GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE

FANTOZZI G. GEMPPM\*\*\*
FAVREL J. PRODUCTIQUE ET INFORMATIQUE DES SYSTEMES MANUFACTURIERS

FAVREL J.
PRODUCTIQUE ET INFORMATIQ
FAYARD J.M.
BIOLOGIE APPLIQUEE
FAYET M.
MECANIQUE DES SOLIDES
FERRARIS-BESSO G.
MECANIQUE DES STRUCTURES
FLAMAND L.
MECANIQUE DES CONTACTS

FLORY A. INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION

FOUGERES R. GEMPPM\*\*\*
FOUQUET F. GEMPPM\*\*\*
FRECON L. INFORMATIQUE

GERARD J.F. MATERIAUX MACROMOLECULAIRES

GERMAIN P. LAEPSI\*\*\*\*
GIMENEZ G. CREATIS\*\*
GOBIN P.F. (Prof. émérite) GEMPPM\*\*\*

GONNARD P. GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE GONTRAND M. GEGELY\*- Composants de puissance et applications

GOUTTE R. (Prof. émérite)

GOUJON L.

GOURDON R.

CREATIS\*\*

GEMPPM\*\*\*

LAEPSI\*\*\*\*.

**GRANGE G.** GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE

GUENIN G. GEMPPM\*\*\*

**GUICHARDANT M.**BIOCHIMIE ET PHARMACOLOGIE **GUILLOT G.**PHYSIQUE DE LA MATIERE

GUINET A. PRODUCTIQUE ET INFORMATIQUE DES SYSTEMES MANUFACTURIERS

GUYADER J.L. VIBRATIONS-ACOUSTIQUE

GUYOMAR D.

GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
HEIBIG A.

LAB. MATHEMATIQUE APPLIQUEES LYON

JACQUET RICHARDET G. MECANIQUE DES STRUCTURES

JAYET Y. GEMPPM\*\*\*

JOLION J.M. RECONNAISSANCE DES FORMES ET VISION JULLIEN J.F. UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Structures

JUTARD A. (Prof. émérite) AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE

KASTNER R. UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Géotechnique

KOULOUMDJIAN J. INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION BIOCHIMIE ET PHARMACOLOGIE LAGARDE M.

LALANNE M. (Prof. émérite) MECANIQUE DES STRUCTURES LALLEMAND A. CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Energétique et thermique CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Energétique et thermique LALLEMAND M. (Mme) UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Géotechnique LAREAL P.

LAUGIER A. PHYSIQUE DE LA MATIERE LAUGIER C. BIOCHIMIE ET PHARMACOLOGIE

LEJEUNE P. GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES

MECANIQUE DES CONTACTS LUBRECHT A. PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE MAZILLE H.

GEMPPM\*\*\* MERLE P. GEMPPM\*\*\* MERLIN J.

INGENIERIE, INFORMATIQUE INDUSTRIELLE MIGNOTTE A. (Mle)

MILLET J.P. PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE

UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Hydrologie urbaine MIRAMOND M.

MECANIQUE DES FLUIDES MOREL R.

LAEPSI\*\*\* MOSZKOWICZ P. GEMPPM\*\*\* MOURA A.

NARDON P. (Prof. émérite) BIOLOGIE APPLIQUEE

AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE NIEL E.

NORTIER P. DREP CREATIS\*\* ODET C. OTTERBEIN M. (Prof. émérite) LAEPSI\*\*\*\*

VIBRATIONS-ACOUSTIQUE PARIZET E.

PASCAULT J.P. MATERIAUX MACROMOLECULAIRES

VIBRATIONS-ACOUSTIQUE PAVIC G.

PELLETIER J.M. GEMPPM\*\*\*

UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Matériaux PERA J.

PERRIAT P. GEMPPM\*\*\*

PERRIN J. ESCHIL - Equipe Sciences Humaines de l'Insa de Lyon

PHYSIQUE DE LA MATIERE PINARD P. (Prof. émérite)

PINON J.M. INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION

PHYSIQUE DE LA MATIERE PONCET A.

POUSIN J. MODELISATION MATHEMATIQUE ET CALCUL SCIENTIFIQUE PREVOT P. GRACIMP - Groupe de Recherche en Apprentissage, Coopération et Interfaces

Multimodales pour la Productique

PROST R. CREATIS\*\*

CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Transferts Interfaces et Matériaux RAYNAUD M.

AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE REDARCE H.

REYNOUARD J.M. UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Structures

MECANIQUE DES SOLIDES RIGAL J.F. RIEUTORD E. (Prof. émérite) MECANIQUE DES FLUIDES

ROBERT-BAUDOUY J. (Mme) (Prof. émérite) GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES

ROUBY D.

ROUX J.J. CENTRE DE THERMIQUE DE LYON – Thermique de l'Habitat

INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION RUBEL P.

RUMELHART C. MECANIQUE DES SOLIDES

CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Transferts Interfaces et Matériaux SACADURA J.F.

MATERIAUX MACROMOLECULAIRES SAUTEREAU H. SCAVARDA S. AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE SOUIFI A. PHYSIQUE DE LA MATIERE INGENIERIE INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

SOUROUILLE J.L.

THOMASSET D. AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE

UBEDA S. CENTRE D'INNOV. EN TELECOM ET INTEGRATION DE SERVICES

THUDEROZ C. ESCHIL - Equipe Sciences Humaines de l'Insa de Lyon

CREATIS\*\* UNTERREINER R.

MECANIQUE DES CONTACTS VELEX P.

VIGIER G. GEMPPM\*\* VINCENT A. GEMPPM\*\*\* CREATIS\*\* VRAY D.

VUILLERMOZ P.L. (Prof. émérite) PHYSIQUE DE LA MATIERE Directeurs de recherche C.N.R.S.:

BERTHIER Y. MECANIQUE DES CONTACTS

CONDEMINE G. UNITE MICROBIOLOGIE ET GENETIQUE COTTE-PATAT N. (Mme) UNITE MICROBIOLOGIE ET GENETIQUE

FRANCIOSI P. GEMPPM\*\*\*

MANDRAND M.A. (Mme) UNITE MICROBIOLOGIE ET GENETIQUE

BIOLOGIE ET PHARMACOLOGIE POUSIN G. ROCHE A. MATERIAUX MACROMOLECULAIRES

SEGUELA A. GEMPPM\*\*\*

Directeurs de recherche I.N.R.A.:

FEBVAY G. BIOLOGIE APPLIQUEE BIOLOGIE APPLIQUEE GRENIER S. RAHBE Y. BIOLOGIE APPLIQUEE

Directeurs de recherche I.N.S.E.R.M.:

BIOLOGIE ET PHARMACOLOGIE PRIGENT A.F. (Mme)

MAGNIN I. (Mme) CREATIS\*\*

\* CEGELY CENTRE DE GENIE ELECTRIQUE DE LYON

\*\* CREATIS CENTRE DE GENTE ELECTRIQUE DE L'INA

\*\*\*GEMPPM CENTRE DE GENTE ELECTRIQUE DE L'INA

\*\*\*GEMPPM GROUPE D'ETUDE METALLURGIE PHYSIQUE ET PHYSIQUE DES MATERIAUX

\*\*\*\*LAEPSI LABORATOIRE D'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DES PROCEDES ET SYSTEMES INDUSTRIELS

#### Remerciements

Le travail présenté ici a été réalisé au sein du Laboratoire des Sciences de l'Habitat (Département Génie Civil et Bâtiment, URA CNRS 1652) de l'ENTPE. Je souhaite donc remercier Monsieur Gérard Guarracino, le directeur du laboratoire, pour m'y avoir accueilli et permis de réaliser mes recherches dans les meilleures conditions.

Je remercie Marc Fontoynont et Dominique Dumortier pour la façon dont ils m'ont dirigé durant mon travail de recherche. Je remercie Marc pour son encadrement et ses conseils clairvoyants et Dominique pour son suivi et sa disponibilité. Tous deux m'ont aidé à apporter rigueur et pertinence à ce travail.

Je souhaite remercier MM. Mike Wilson, Professeur à la London Metropolitan University, et Gilbert Achard, Professeur à l'Université de Savoie, pour avoir accepté de rapporter ce travail.

Je remercie également M. Jean-Jacques Roux, Professeur à l'INSA de Lyon, pour avoir accepté de participer au jury de cette thèse.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à la société SOMFY pour avoir financé ce travail, et plus particulièrement MM. Jean-Pierre Peillon et Eric Chéron, qui a accepté d'être membre du jury de cette thèse. Merci également à Alexandre Aleya pour le développement du logiciel d'acquisition.

Je remercie également les sociétés Lyon Store et Perdrix Electricité pour avoir réalisé les réfections nécessaires à ma campagne de mesures.

Je remercie l'équipe du LASH et particulièrement le groupe lumière et rayonnement électromagnétique. Un grand merci à Pascale Avouac pour son aide concernant le traitement des images et graphiques présentés ici. Merci également à Fawaz et Virgile pour le quotidien.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude envers Mmes Chazelle, Lainez, Lévèque, Mellet, Miras et Paire-Ficout ainsi que MM Garnier et Pailleux, sans qui ce travail n'aurait pu avoir lieu. Je les remercie sincèrement pour avoir accepté d'être observés durant plus de huit mois afin de donner la matière nécessaire à cette thèse! Je tiens à m'excuser auprès d'eux pour les désagréments éventuels que mon travail a pu occasionner.

Enfin, merci, merci et encore merci à ceux qui ont toujours été là. Vous savez qui vous êtes.

## Résumé

Le travail sur écran de visualisation requiert des conditions d'éclairage d'ambiance contrôlées, afin de garantir des conditions de confort visuel correctes à un occupant de bureau. En ce qui concerne l'éclairage naturel, le meilleur moyen de contrôler la lumière naturelle reste la protection solaire.

A l'heure actuelle, les automatismes de pilotages des stores vénitiens proposés sur le marché sont souvent basés sur des consignes binaires, c'est-à-dire que le store sera baissé à partir d'un certain seuil d'éclairement en façade uniquement (on trouve souvent la valeur de 50 klux). Certains systèmes intègrent toutefois la position du soleil, les lames d'un store vénitien sont inclinées de manière à bloquer le rayonnement solaire direct. Aucun automatisme de pilotage ne tient compte, à notre connaissance, de critères de confort visuel, d'informations comportementales et de l'environnement interne et externe.

L'objectif du travail que nous présentons est de réaliser un modèle destiné au pilotage automatique de stores vénitiens qui permet de garantir les meilleures conditions de confort visuel à un occupant de bureau, quelles que soient les conditions climatiques extérieures, tout en lui faisant profiter au maximum de la lumière naturelle. Le modèle que nous avons élaboré utilise des informations photométriques issues de la caractérisation optique empirique de la fonction de transfert lumineux d'un store vénitien, que nous avons bâtie à l'aide de mesures en cellules-test et sur maquettes.

Les consignes de pilotage de ce modèle sont basées sur des critères de confort visuel (luminance de voile sur écran à ne pas dépasser et uniformité des luminances dans le champ de vision) et des conclusions tirées d'une campagne de mesures d'utilisation des stores que nous avons menée auprès d'un panel de sujets assez restreint (huit), mais durant une longue période (trente semaines). Cette campagne de mesures a été mise en place et élaborée par nos soins. Nous avons enregistré toutes les quinze minutes, la façon dont les sujets utilisent leur store vénitien en parallèle à des paramètres tels que l'éclairement sur la baie, la luminance de voile sur l'écran, la température ambiante dans la pièce, l'état de l'éclairage artificiel, ou encore la présence des occupants.

Les résultats de cette campagne nous ont permis dans un premier temps de valider les critères de confort visuels intégrés au modèle, et dans un second temps de caler notre modèle à partir des observations comportementales effectuées.

L'analyse des résultats traduisant les comportements réels de sujets en situation de travail sur écran nous a permis d'établir plusieurs constats. Voici les principaux:

• Les recommandations concernant les rapports de luminance entre la tâche visuelle, l'ergorama et le panorama (1:3:10), souvent citées dans les standards

d'éclairage, ne semblent pas être valides dès lors qu'une source d'éclairage naturel est présente dans le champ de vision.

- Les recommandations de Blackwell concernant les luminances de voile à ne pas dépasser sur écran de visualisation apparaissent trop restrictives en éclairage naturel pour les écrans de qualité mauvaise à standard.
- Une protection solaire motorisée est utilisée trois fois plus qu'une protection solaire contrôlée manuellement.
- Les individus placent leurs stores vénitiens essentiellement en position basse, lames horizontales, ou inclinées vers le sol extérieur.
- Les individus ouvrent leurs stores vénitiens à un seuil d'éclairement vertical extérieur très inférieur à celui auquel ils les ferment. Cet hystérésis peut atteindre la valeur de 30 klux.
- Les individus positionnent leurs stores vénitiens de manière à ce que la luminance de la baie la plus proche reste inférieure à 1800 cd/m² en moyenne, pendant 75 % du temps.

Ces observations, déduites de mesures in-situ, nous ont permis de caler notre modèle afin qu'il soit plus proche, dans la mesure du possible, du comportement de nos sujets. Même si nous avons toutefois observé des cohérence individuelles, il est important de garder en mémoire qu'il est difficile de produire un modèle universel pouvant prédire la façon dont les individus utiliserons leurs stores vénitiens.

Par exemple, la valeur des seuils d'acceptation de luminance maximale de la baie peut être jusqu'à cinq fois plus élevée d'un sujet à un autre, en fonction de sa sensibilité à la lumière ou de la configuration de son espace.

Pour remédier à ces différences individuelles, il faut, soit que le système de pilotage automatique de la protection solaire puisse temporairement être désactivé par l'individu s'il le désire, soit que les consignes de pilotage puissent être adaptées à chaque individu.

#### Abstract

In order to guarantee good visual comfort conditions to an office worker, it is necessary to take special care of the amount of light arriving on and surrounding the VDU screen. As far as daylight is concerned, the best way to control this remains solar protection.

Nowadays, the automated control systems for Venetian blinds available on the market are often based on binary instructions. That is to say the blind will be lowered when a certain level of illuminance on the facade is reached. Though some automated control systems take the position of the sun in the sky vault into account, so that the slats are tilted in order to block direct sunlight penetration inside the room. As far as we are aware, no automated control systems for Venetian blinds feature instructions based on visual comfort nor behavioural nor indoor and outdoor environment considerations.

The goal of the work that has been done here was to make up a model aimed to automatically control Venetian blinds in order to guarantee the best visual comfort conditions to an office worker, whatever the outside climate is, and at the same time to offer the maximum conceivable daylight. The model that we have built embodies photometric considerations resulting from an experimental optical characterisation of the luminous transfer function of a Venetian blind, which was deduced from measurements made inside test cells and scale models.

The control instructions are based upon visual comfort criteria (veiling luminance not to be exceeded on the VDU screen and luminance uniformity in the visual field) and upon conclusions deduced from a field study that was conducted among a relatively short panel of subjects (eight) but during a long time span (eight months). We have registered every fifteen minutes, the way that the subjects were using their Venetian blinds as well as parameters such as the illuminance on the window, the veiling luminance on the VDU screen, the ambient temperature inside the office, the state of the artificial lighting and the configuration of the room.

The results of this field study allowed us to validate the visual comfort criteria included inside the model in the first place, and then to adjust our model with the help of the behavioural observations deduced from the measurement campaign.

The analysis of the results testifying to the real behaviour of VDU office workers allowed us to make several observations. Here are the main ones:

- Recommendations concerning the luminance ratios in the visual field (1:3:10 rule), often mentioned in many lighting standards, do not seem to be validated as soon as a daylight source fulfils a part of the visual field.
- Blackwell's recommendations concerning the veiling luminance on the VDU screen not to be exceeded appear to be too severe under daylight for bad to standard quality screens.

- A motorized solar protection is used three times more often that a manually controlled one.
- Office workers mainly leave their Venetian blinds totally lowered, with slats horizontally orientated or tilted towards the ground outside.
- Users open their Venetian blinds at a lower vertical outside illuminance threshold than the one at which they close them. This hysteresis can reach the value of 30 klux.
- Users position their Venetian blinds so that the closest window luminance remains under the mean value of 1800 cd/m<sup>2</sup>, during 75 % of the time.

These observations, deduced from in-situ measurements, allowed us to adjust our model to match our subjects' behaviour, as far as possible. Even if we have somehow observed some individual coherences, it is important to keep in mind that it is difficult to produce a universal model that is able to predict the way office workers will use their Venetian blinds.

For example, the maximum window luminance acceptance thresholds can be five times higher from a subject to another, according to their sensibility to daylight or the configuration of his office.

In order to compensate these individual differences, either the Venetian blinds control system must be able to be temporarily turned off by the office worker if so wanted, or the control instructions can be adapted to each individual.

# Tables des matières.

| Introduction générale.   | 21              |
|--|-----------------|
| Chapitre 1. Confort et performance visuels en éclairage naturel.             | 23              |
| I.1. La lumière et l'individu.   | 24              |
| I.1.1. Eclairage et productivité.  | 24              |
| I.1.2. La lumière dans le code du travail [INRS, 2000]                       | 24              |
| I.1.3. Lumière & santé.  | 25              |
| I.2. La notion d'éblouissement.  | 26              |
| I.2.1. Définitions.  | 26              |
| I.2.2. Quantification de l'éblouissement d'incapacité.                       | 27              |
| I.2.2.1. Reflets et diminution du contraste sur l'écran de                   |                 |
| visualisation.   | 27              |
| I.2.2.2. Rapports de luminances dans le champ de vision.                     | 34              |
| I.2.2.3. Conclusions sur la quantification de l'éblouissement d'incapaci     | té.             |
|  | 35              |
| I.2.3. Eblouissement d'inconfort.  | 36              |
| I.2.4. Eblouissement dû aux fenêtres.  | 38              |
| I.3. Notions d'ergonomie.  | 39              |
| I.3.1. Définitions & généralités.  | 39              |
| I.3.2. Ergonomie au poste de travail.  | 40              |
| I.4. Critères de confort et performance visuels à valider.                   | 41              |
| Chanitra 2 Staras vánitiana, fanation de transfert et madèle                 |                 |
| Chapitre 2. Stores vénitiens: fonction de transfert et modèle d'utilisation. | 43              |
|  |                 |
| II.1. Caractérisation optique de stores vénitiens.                           | 44              |
| II.1.1. Introduction   | 44              |
| II.1.2. Principe de la modélisation empirique.                               | 45              |
| II.1.3. Principe du traitement des images.                                   | 47              |
| II.1.4. Fonction de transfert du store vénitien.                             | 47              |
| II.1.4.1. Cas du ciel couvert ou clair sans rayonnement solaire direct.      | 47              |
| II.1.4.2. Cas du ciel clair avec rayonnement solaire direct.                 | . 54            |
| II.1.4.2.1. Inclinaison des lames pour bloquer le rayonnement soi            |                 |
| direct.  | 54<br>57        |
| II.1.4.2.2. Valeur de l'éclairement sur l'écran.                             | 57<br><b>60</b> |

| II.1.6. Correction du modèle en fonction de la couleur des lames du        |           |    |
|--|-----------|----|
| store.   |           | 60 |
| II.1.7. Correction des valeurs en fonction de la hauteur des obstruction   | ns        |    |
| face à la baie.  | 62        |    |
| II.1.8. Validation du modèle.  | 65        |    |
| II.1.8.1. En ciel couvert.   | 65        |    |
| II.1.8.2. En présence de rayonnement solaire direct.                       | 66        |    |
| II.1.9. Utilisation des images pour l'application des critères de confort  |           |    |
| visuel.  | 67        |    |
| II.1.10. Autres positions d'écran.   | 69        |    |
| II.1.10.1. L'écran tourne le dos à la baie.                                | 70        |    |
| II.1.10.2. L'écran fait face à la baie.                                    | 70        |    |
| II.1.11. Codage  | 71        |    |
| II.2. Comparaison avec des observations faites à l'intérieur d'un          |           |    |
| bureau réel.   | 71        |    |
| II.2.1. Contexte et description du bureau utilisé.                         | 71        |    |
| II.2.2. Méthode.   | 72        |    |
| II.2.3. Résultats et positions de stores recommandées.                     | 72        |    |
| II.2.4. Conclusions et perspectives.                                       | 73        |    |
| II.3. Application du modèle et exemples.                                   | 73        |    |
| II.3.1. Exemples   | 73        |    |
| II.3.1.1. Influence de la position de l'écran                              | 73        |    |
| II.3.1.2. Influence de la distance entre l'écran et la fenêtre.            | 75        |    |
| II.3.1.3. Influence de la luminance de l'écran.                            | 75        |    |
| II.4. Conclusions et perspectives.   | <b>76</b> |    |
| ii.4. Conclusions of perspectives.   | 10        |    |
| Chapitre 3. Suivi et anlyse de l'utilisation de stores vénitiens.          | 79        |    |
| III 4. Etat da la guartian   | 90        |    |
| III.1. Etat de la question   | 80        |    |
| III.1.1. Introduction  | 80        |    |
| III.1.2. Etudes antérieures  | 81        |    |
| III.2. Descriptif des campagnes de mesure.                                 | 81        |    |
| III.2.1. Etude sur les commandes motorisées.                               | 82        |    |
| III.2.1.1. Mesure de l'éclairement.  | 82        |    |
| III.2.1.2. Mesure de la position des stores vénitiens.                     | 82        |    |
| III.2.1.3. Mesure de l'état de l'éclairage artificiel et de la température | 00        |    |
| ambiante   | 82        |    |
| III.2.1.4. Mesure de la présence des occupants.                            | 83        |    |
| III.2.2. Etude sur les commandes manuelles.                                | 83        |    |
| III.2.3. Choix des sites.  | 83        |    |
| III.2.3.1. Site de la campagne de mesure.                                  | 83        |    |
| III.2.3.2. Site de l'étude à l'aide d'une webcam.                          | 84        |    |
| III.3. Questionnaire préliminaire soumis aux sujets.                       | 85        |    |
| III.4. Hypothèses de travail.  | 86        |    |
| III 4 1 Hynothèses concernant le confort visuel                            | 86        |    |

| III.4.2. Hypothèses concernant l'utilisation des stores.                 | 87  |
|--|-----|
| III.5. Note sur les traitements des données.                             | 90  |
| III.5.1. Problèmes rencontrés.   | 90  |
| III.5.2. Traitement des données.   | 91  |
| III.6. Résultats.  | 92  |
| III.6.1. Hypothèse 1 (luminances de voile).                              | 92  |
| III.6.1.1. Luminance de voile.   | 92  |
| III.6.1.2. Performance visuelle.   | 95  |
| III.6.1.3. Conclusions sur l'hypothèse 1.                                | 96  |
| III.6.2. Hypothèse 2 (rapports de luminance dans le champ de vision).    | 97  |
| III.6.2.1. Résultats.  | 97  |
| III.6.2.2. Conclusions sur l'hypothèse 2.                                | 98  |
| III.6.3. Hypothèse 3 (indices de confort visuel).                        | 98  |
| III.6.3.1. Résultats.  | 98  |
| III.6.3.2. Conclusions sur l'hypothèse 3.                                | 100 |
| III.6.4. Hypothèse 4 (fréquence d'utilisation des protections solaires). | 101 |
| III.6.4.1. Résultats.  | 101 |
| III.6.4.2. Conclusion sur l'hypothèse 4.                                 | 102 |
| III.6.5. Hypothèse 5 (modes d'utilisation du store).                     | 102 |
| III.6.5.1. Utilisation individuelle.                                     | 102 |
| III.6.5.2. Utilisation moyenne.  | 107 |
| III.6.5.3. Conclusions sur l'hypothèse 5.                                | 108 |
| III.6.6. Hypothèse 6 (seuils de déclenchement du store).                 | 109 |
| III.6.6.1. Utilisation individuelle des stores au quotidien.             | 109 |
| III.6.6.2. Utilisation des stores en mode 1.                             | 113 |
| III.6.6.3. Utilisation en mode 2.  | 116 |
| III.6.6.4. Hypothèse 6.1 (seuil d'éclairement vertical extérieur).       | 117 |
| III.6.6.5. Hypothèse 6.2 (seuil de luminance de baie).                   | 118 |
| III.6.6.6. Hypothèse 6.3 (hystérésis).                                   | 120 |
| III.6.6.7. Conclusions sur l'hypothèse 6.                                | 122 |
| III.6.7. Hypothèse 7 (utilisation de l'éclairage artificiel).            | 123 |
| III.6.7.1. Résultats.  | 123 |
| III.6.7.2. Conclusion sur l'hypothèse 7.                                 | 124 |
| III.6.8. Hypothèse 8 (influence de la température intérieure).           | 124 |
| III.6.8.1. Résultats.  | 124 |
| III.6.8.2. Conclusion sur l'hypothèse 8.                                 | 128 |
| III.6.9. Hypothèse 9 (influence de la position de l'écran).              | 129 |
| III.6.9.1. Résultats.  | 129 |
| III.6.9.2. Conclusion sur l'hypothèse 9.                                 | 130 |
| III.7. Résumé et conclusions générales.                                  | 130 |
| Chapitre 4. Amélioration du modèle théorique.                            | 133 |
| IV.1. Adaptation du modèle analytique en fonction de l'analyse d         | es  |
| résultats de la campagne de mesures.                                     | 134 |

| IV.1.1. Seuil de déclenchement du store vers le bas.                | 134     |
|---|---------|
| IV.1.2. Inclinaison des lames.                                      | 135     |
| IV.1.2.1. Luminance de voile à ne pas dépasser sur l'écran.         | 135     |
| IV.1.2.1. Rapports de luminance dans le champ de vision.            | 135     |
| IV.1.2.1. Blocage du rayonnement solaire direct.                    | 136     |
| IV.1.3. Seuil de déclenchement du store vers le haut et inclinaison | า des   |
| lames pour plus de lumière.   | 136     |
| IV.1.4. Cas des autres positions d'écran.                           | 136     |
| IV.2. Comparaison des données mesurées avec les résultats           | fournis |
| par le modèle modifié.  | 137     |
| IV.2.1. Comportement individuel.                                    | 140     |
| IV.2.2. Comportement général.                                       | 141     |
| IV.2.3. Apport lumineux.  | 143     |
| IV.3. Utilisation d'une protection solaire à travers l'Europe.      | 144     |
| IV.4. Conclusions et perspectives.                                  | 150     |
| Conclusion générale et perspectives                                 | 153     |
| Références bibliographiques   | 155     |
| Annexes   | 161     |
| Annexe 1. Description des sites de mesure et du matériel.           |         |
| Annexe 2. Questionnaire.  |         |

Annexe 3. Conditions météorologiques sur le site de mesures durant la campagne.

Annexe 4. Fréquences de dépassement d'éclairement verticaux en fonction de l'orientation.

## Introduction générale.

Aujourd'hui, le store vénitien représente plus de la moitié du marché de la protection solaire, dans le domaine tertiaire. La fraction de stores motorisés est faible (0.1 %), mais amenée à s'étendre. Les premiers automatismes de protections solaires sont apparus à la fin des années soixante-dix. Ils étaient basés sur un fonctionnement tout ou rien et étaient déclenchés à partir d'un certain seuil d'éclairement sur la baie. Afin d'améliorer ces automatismes, de nouveaux systèmes sont apparus au milieu des années quatre-vingt-dix. Ils sont élaborés pour commander un store vénitien de manière à ce que les lames s'inclinent pour bloquer le rayonnement solaire direct. Malgré l'avancée que présente ce type de système de pilotage de stores vénitiens, les industriels de l'automatisme et de la motorisation, tel SOMFY qui a financé ce travail, se sont rendu compte qu'il est difficile de proposer un système destiné à contrôler la lumière naturelle offerte à un individu, sans vraiment comprendre la façon dont celui-ci perçoit la lumière dans son espace de travail. L'étape suivante consiste à offrir à un individu une amélioration des conditions de confort visuel dans son espace de travail, à l'aide d'une protection solaire automatisée. Un des buts de cette démarche est également de pouvoir établir un lien entre une gestion optimisée du store vénitien et l'efficacité au travail.

Ainsi, la problématique d'un industriel tel que SOMFY a-t-elle évolué vers une prise en compte accrue du comportement de l'individu, en mettant un peu de coté l'aspect "gain énergétique" de ce type de produits.

En parallèle, les équipes de recherche s'intéressant à la lumière ont depuis quelques années lancé des études comportementales visant à établir une meilleure compréhension de la perception de la lumière. Auparavant, l'accent était davantage mis sur les performances photométriques précises des systèmes d'éclairage. On peut donc constater une évolution des esprits comparable, dans le domaine de la recherche et dans l'industrie.

Le travail de thèse présenté ici s'inscrit dans la continuité des travaux jusqu'alors effectués sur la perception des ambiances lumineuses, au Laboratoire des Sciences de l'Habitat de l'ENTPE, et au sein de divers groupes de recherche internationaux (comme récemment la sous-tâche A de l'IEA 31 *Daylight in buldings of the 21*<sup>st</sup> century).

La possibilité pour un individu de contrôler son environnement lumineux ajoute à un espace de travail un agrément démontré [Escuyer, 2001 #94].

Le point le plus difficile à comprendre reste les facteurs qui poussent un individu travaillant dans son bureau, à en modifier l'ambiance lumineuse.

En ce qui concerne la perception de la lumière naturelle, de nombreux paramètres entrent en compte pour influencer les préférences lumineuses de chacun: la quantité de lumière disponible à l'extérieur (le niveau d'éclairement sur la baie), l'intérêt et

l'accès à la vue vers l'extérieur, la qualité de l'écran de visualisation (sa luminance dans le noir) ou encore l'état d'humeur de l'individu.

Les protections solaires peuvent également être manipulées en réponse à des situations d'inconfort visuel. Il existe des indices ou des recommandations permettant de caractériser théoriquement le confort visuel en éclairage naturel (souvent adaptés de l'éclairage artificiel), ceux-ci sont cependant assez peu validés sur le terrain. On peut donc se demander si un individu réagit effectivement selon ces critères de confort visuel.

Aussi, pour valider et adapter les indices et recommandations concernant le confort visuel, le seul moyen valable reste de suivre le comportement d'un sujet en situation réelle afin d'essayer d'en tirer une cohérence. Cela permettra également de comprendre en fonction de quels facteurs, un individu utilise sa protection solaire. Ce suivi doit être effectué sur le long terme étant donné la variabilité de la lumière naturelle et l'influence des saisons sur la perception [Laurentin, 2001 #102].

Notons ici que nous nous intéressons à l'aspect visuel du confort. Mais nous sommes conscients que l'ambiance thermique joue un rôle en ce qui concerne la perception de la lumière naturelle. La question est de savoir comment quantifier cette influence de l'ambiance thermique sur l'ambiance visuelle.

Les stores motorisés peuvent être actionnés, soit à l'aide d'un interrupteur ou d'une télécommande, soit automatiquement suivant une consigne.

Aussi, l'acceptation de l'automatisme, donc de la consigne de déclenchement, par les utilisateurs dépend-elle de sa fidélité à reproduire le comportement des individus, ou tout du moins, à ne pas les déranger. En effet, il a été observé lors d'une étude récente [Reinhart, 2001 #93] que 45 % des actions décidées par un automatisme de pilotage des stores, étaient rejetées par les utilisateurs qui prenaient alors la main sur l'automatisme. Il a également été mis en évidence qu'un système de contrôle de l'éclairage naturel ou artificiel doit pouvoir être à tout moment désactivé par l'utilisateur [Velds, 1999 #71] afin que ce dernier puisse se sentir libre d'agir sur sa protection solaire, à tout moment, comme il le souhaite.

Par conséquent, il est important de fournir une consigne de commande des stores vénitiens, qui soit basée sur des mesures sur le terrain du comportement des utilisateurs. Nous sommes conscients qu'il est difficilement envisageable de fournir un automatisme de protection solaire qui soit universel, mais l'enjeu est de proposer un système de commande qui ne dérange pas les individus, tout en garantissant des conditions de confort visuel optimales et un maximum de lumière naturelle, et ce, quel que soit le climat. On peut finalement se demander quel sera le gain, en termes de lumière naturelle et de confort, apporté par un store vénitien automatisé en comparaison à un store contrôlé manuellement.

# **Chapitre 1**

Confort et performance visuels en éclairage naturel.

#### I.1. La lumière et l'individu.

#### I.1.1. Eclairage et productivité.

Les informations et les chiffres traitant de l'influence positive de la lumière naturelle sur la productivité sont assez rares. Il est en effet difficile de mettre en place un protocole expérimental qui démontre de manière irréfutable cette hypothèse. Cependant, suite à la demande de nombreux industriels (de la lumière ou non) et concepteurs de batiments, cette thématique fait l'objet d'actions d'équipes de recherche internationales.

Il semblerait que, en ce qui concerne le gain de productivité induit par un environnement de travail privé de toute gêne (lumineuse, acoustique ou thermique), le chiffre de 20 à 30 % soit souvent cité par les médias et la presse de vulgarisation. En d'autres termes, lorsqu'un employé se trouve dans une ambiance lumineuse, thermique et acoustique agréable, sa productivité serait améliorée de 20 à 30 %.

Fisk [Fisk, 2000] est conscient qu'il y a beaucoup d'incertitude lorsqu'il s'agit dévaluer l'ampleur des gains de productivité apportés par une ambiance de travail où toute sollicitation gênante est absente. Il annonce cependant que, pour les Etats-Unis et en première estimation, l'amélioration des conditions de travail des employés de bureaux peut engendrer annuellement entre 20 et 160 milliards de dollars d'économies et de gains de productivité.

Selon un rapport du Rocky Mountain Institute, Colorado, USA, une meilleure pénétration de la lumière naturelle diminue en quelques jours le taux d'absentéisme et le nombre d'erreurs commises au travail [Pierson, 1995].

En 1979, aux USA, des travaux de réfection ont eu lieu à l'intérieur d'un bâtiment administratif où l'accent fut mis sur une meilleure pénétration de la lumière naturelle grâce à des systèmes de prises de jour sophistiquées. La conséquence la plus inattendue de ces modifications fut une augmentation de la productivité suite à une baisse de 15 % de l'absentéisme [Pierson, 1995].

D'après Fontoynont [Fontoynont, 2000], un éclairage naturel de qualité signifie une bonne amélioration des conditions de travail sur de longues périodes. De bonnes protections solaires sont susceptibles d'améliorer les conditions de travail dans les bureaux pendant au moins 1000 heures par an, alors que l'amortissement de leur investissement se fait sur un montant annuel de l'ordre de 5 à 10 heures de coûts salariaux.

## I.1.2. La lumière dans le code du travail [INRS, 2000]

À titre indicatif, le dernier alinéa de l'article 7 du décret n° 91-451 du 14 mai 1991 prévoit, entre autres, que "l'écran doit être exempt de reflets et de réverbérations susceptibles de gêner l'utilisateur". Pour les matériels en service avant le 1<sup>er</sup> Janvier 1993, cette disposition est applicable depuis le 1<sup>er</sup> Janvier 1997.

Décret n°92-333 du 31 mars 1992.

Art. R. 232-7-4 : Les postes de travail situés à l'intérieur des locaux de travail doivent être protégés du rayonnement solaire gênant soit par la conception des ouvertures, soit par des protections fixes ou mobiles appropriées.

Décret n°92-333 du 31 mars 1992.

Art. R. 232-7-5 : Les dispositions appropriées doivent être prises pour protéger les travailleurs contre l'éblouissement et la fatigue visuelle, provoqués par des surfaces à forte luminance ou par des rapports de luminance trop importants entre surfaces voisines.

L'article R.235-2 du code du travail recommande au maître d'ouvrage responsable de la conception d'un bâtiment, de privilégier l'éclairage naturel dans la mesure où l'activité exercée le permet. Cet article évoque le fait que la lumière artificielle ne devrait fournir qu'un rôle d'appoint dans la mesure où elle ne fournit pas à l'individu les repères qui rythment le déroulement d'une journée.

#### I.1.3. Lumière & santé.

La lumière a sur l'être humain des effets prouvés. Ces effets peuvent être aussi bien d'ordre physiologique que psychologique.

La lumière soigne [Santé, 2000]. Elle soigne certaines maladies inflammatoires cutanées (dermatoses). Le traitement adapté est la photothérapie, également connue sous le nom de puvathérapie, traitement associant un rayonnement sous forme d'UVA et d'un médicament photosensibilisant. La photothérapie soigne également le problème fréquent de la jaunisse du nouveau-né.

Il existe aussi des traitements appelés photochimiothérapie qui soignent les tumeurs cancéreuses superficielles. Une substance photosensible non toxique est appliquée sur les tissus cancéreux, et sous l'action d'une lumière rouge, elle se transforme en produit toxique détruisant la tumeur.

Mais l'aspect qui nous intéresse davantage ici, est la façon dont la lumière rythme notre vie au quotidien, la façon dont elle influe sur notre moral.

Le manque de lumière empêche la sécrétion de mélatonine (glande épiphyse). La sécrétion de mélatonine se produit pendant la nuit en réponse à l'obscurité. La synthèse et la mise en circulation de la mélatonine sont inhibées par la lumière: c'est l'hormone du rythme circadien, l'horloge biologique interne de l'être humain. Le réglage ou déréglage du rythme circadien de chacun est donc induit par les événements lumineux extérieurs. La manifestation la plus courante du déréglage de ce cycle est le phénomène de jet lag (troubles du sommeil la nuit, somnolences le jour) [Perdriel, 2000].

Le syndrome dépressif saisonnier ou SAD (Seasonal Affective Disorder) est également une conséquence courante du manque de lumière. Il a fallu attendre 1981 avant de s'apercevoir que plus de la moitié de nos contemporains, en particulier les femmes, est nettement moins en forme en automne qu'au printemps, et que 5 à 8 % d'entre nous développent sous nos latitudes une véritable dépression saisonnière. Cette maladie, car c'en est bien une, est faite de fatigue, de somnolence, de boulimie

sucrée (envies incoercibles de sucreries, notamment de chocolat) et provoque une prise de poids. La tristesse commence en octobre-novembre, s'aggrave tout au long de l'automne pour culminer à Noël, jusqu'à ce que tout s'arrange à Pâques, en attendant l'automne suivant. Il a fallu également du temps aux chercheurs pour découvrir les bienfaits de la lumière en démontrant que face au SAD, ce ne sont pas les médicaments qui sont les plus efficaces, mais l'exposition à une lumière blanche, brillante, produisant un éclairement lumineux supérieur à 2500 lux. Quotidiennes pendant au moins deux semaines, parfois pendant toute la mauvaise saison, les séances de photothérapie d'une durée de 30 à 120 minutes sont efficaces au bout de quatre jours, et permettent d'éviter cette pseudo-hibernation qui parfois se transforme en dépression. [Lemoine, 2001]

#### I.2. La notion d'éblouissement.

D'après le vocabulaire international de l'éclairage [CIE, 1987], l'éblouissement est caractérisé par des conditions de vision sous lesquelles on éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer les détails ou les objets, par suite d'une répartition défavorable des luminances ou d'un contraste excessif.

On distingue deux formes d'éblouissement: inconfort et incapacité.

L'éblouissement d'inconfort est une sensation, donc comme toute sensation, c'est un phénomène subjectif. Nous verrons plus loin les méthodes permettant de quantifier l'éblouissement inconfortable qui existent à l'heure actuelle, ainsi que leur validité. En revanche lorsque l'on parle d'éblouissement d'incapacité, autrement dit de baisse de performance visuelle, il s'agit d'un phénomène physiologique, qui est davantage quantifiable. En Allemand, on parle d'ailleurs de "psychologische Blendung" (éblouissement psychologique) pour désigner l'éblouissement d'inconfort, et de "physiologische Blendung" (éblouissement physiologique) pour parler d'éblouissement d'incapacité [CIE, 1987].

#### I.2.1. Définitions.

L'éblouissement d'inconfort produit une sensation désagréable sans nécessairement troubler la vision des objets, et l'éblouissement d'incapacité trouble la vision des objets sans provoquer nécessairement une sensation désagréable [CIE, 1987]. Les deux phénomènes peuvent toutefois se produire simultanément, comme le cas d'un reflet d'une source d'éclairage sur un écran de visualisation, la tache lumineuse réfléchie peut causer une gêne à l'utilisateur tout en l'empêchant de distinguer correctement les caractères.

La majorité des individus ne savent pas identifier lorsqu'ils subissent une situation d'inconfort visuel. En revanche, ils en subissent les conséquences : maux de tête, picotements d'yeux, stress... Ces effets ne sont pas nécessairement accompagnés d'une diminution de la visibilité et ne se manifestent pas immédiatement. Sans action instantanée sur la performance visuelle, ils peuvent à terme l'influencer.

L'éblouissement d'incapacité se traduit par une baisse de la performance visuelle, qui est le degré d'efficacité du système visuel, tel qu'il est mesuré par exemple en évaluant la vitesse et la précision avec lesquelles une tâche visuelle est accomplie.

Les résultats sont fournis notamment sous forme de courbes de seuils de performance visuelle pour des conditions données [Blackwell, 1946].

L'éblouissement d'incapacité est un effet instantané et indolore qui conduit à une perte de visibilité, comme par exemple un reflet sur un écran d'ordinateur ou un effet de contre jour.

#### I.2.2. Quantification de l'éblouissement d'incapacité

Dans le cas du travail sur écran de visualisation, qui est notre domaine d'investigation, la baisse de performance visuelle peut être due à différents facteurs. Le terme "performance visuelle" est utilisé pour quantifier les aptitudes d'une personne à détecter, identifier et analyser les détails entrant dans son champ de vision, en se fondant sur la vitesse, la qualité et la précision de sa perception. La performance visuelle dépend à la fois des caractéristiques propres à la tâche à accomplir (dimension, forme, position, couleur et facteurs de réflexion des détails et du fond) et de la perception influencée, elle-même, par les conditions d'éclairage (manque d'uniformité de l'éclairage, éblouissement,...).

La performance visuelle est en outre affectée par d'autres paramètres tels que la capacité du système visuel de l'observateur, les perturbations distrayant l'attention, la nature de l'arrière-plan et, de manière plus générale, la façon dont est conçu l'espace de travail [AFE, 1993].

#### I.2.2.1. Reflets et diminution du contraste sur l'écran de visualisation.

Lorsqu'une source lumineuse, qu'elle soit primaire ou secondaire (fenêtre, luminaire, mur clair), est située face à un écran de visualisation, on peut distinguer sur celui-ci un reflet plus ou moins important. La norme ISO 9241-6 [ISO, 1999] propose de limiter la luminance de ces reflets en fonction de la qualité de l'écran. Trois classes sont ici définies, et à chacune est associée une luminance maximale que ne devrait pas dépasser la source se reflétant sur l'écran, voir table 1.1.

| Classe de l'écran | Qualité de l'écran | Luminance maxi de la source (cd/m²) |
|-------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1                 | Bonne              | 1000                                |
| 2                 | Moyenne            | 1000                                |
| 3                 | Faible             | 200                                 |

Table 1.1: Luminances maximale des sources se reflétant sur l'écran selon la norme ISO 9241-6

Les classes d'écran correspondent à la tâche à laquelle ils sont destinés. Les écrans de classe 1 conviennent pour le travail de bureautique, ceux de classe 2 conviennent pour la majorité, mais pas tous, des environnements de bureau, et ceux de la classe 3 requièrent un environnement lumineux spécialement contrôlé. Dans cette norme, il n'est pas fait état des luminances initiales des écrans des différentes classes.

Dans ce type de situations, la réflexion sur l'écran sera essentiellement spéculaire, donc également source d'éblouissement d'inconfort. Néanmoins, si l'on considère un

écran à 10 % de coefficient de réflexion, la luminance maximale des reflets vaudra 100 cd/m2 pour les classes 1 et 2 et 20 cd/m2 pour la classe 3.

Par la suite nous nous intéresserons davantage à la luminance supplémentaire, due à l'éclairage global de la pièce, qui vient s'ajouter sur l'écran de visualisation. Cette luminance est appelée luminance de voile.

Sur un écran de visualisation, on peut lire les caractères car il existe un contraste suffisant entre le fond de l'écran et les caractères.

Le contraste de luminance est défini par le rapport:

$$C = \frac{|L_d - L_f|}{L_f} \quad (éq. \ 1.1)$$

où  $L_d$  désigne la luminance du détail et  $L_f$  celle du fond sur lequel l'objet se détache. Ainsi, le contraste de seuil ( $C_s$ ) est défini par le plus petit contraste observé, pour lequel un objet peut être perçu sur un fond déterminé. [CIE, 1987]

Lorsque le local dans lequel est situé l'écran de visualisation est éclairé, la luminance du caractère et la luminance du fond sur lequel il se détache, reçoivent l'appoint d'une luminance parasite diffuse, dite luminance de voile  $L_v$ . Le contraste entre le fond et le caractère est ainsi diminué. Il devient égal à:

$$C = \frac{|(L_d + L_v) - (L_f + L_v)|}{(L_f + L_v)} = \frac{|L_d - L_f|}{(L_f + L_v)} (\acute{e}q. 1.2)$$

Une luminance de voile peut avoir deux composantes distinctes, une partie spéculaire, due au reflet d'une source lumineuse primaire ou secondaire sur l'écran, et une partie diffuse.

L'Association Française de l'Eclairage [AFE, 1997] propose une méthode, basée sur des critères de niveaux de visibilité optimums (théorie de Blackwell), qui permet de connaître la luminance de voile maximale acceptable (composante spéculaire + composante diffuse) sur un écran pour que les conditions de visibilité ne soient pas altérées.

Les expériences de Blackwell [Blackwell, 1946] constituent un exemple de mesure de visibilité en situation réelle. Elles ont consisté à trouver le seuil de contraste d'un observateur normal sous différentes conditions expérimentales.

Les observateurs étaient placés à une grande distance (65m) d'un mur sur lequel étaient présentés des stimuli lumineux de différentes tailles, niveaux d'éclairement et de contraste. Neuf observatrices entrainées, agées de 19 à 26 ans, ont fourni 450000 réponses.

Les résultats montrent comment le niveau d'éclairement du fond agit sur le niveau d'éclairement que doit atteindre la cible pour être détectée. [Viénot, 1998]

Les résultats de Blackwell ont largement permis à la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) de proposer une méthodologie et un modèle applicable à la mesure de la performance visuelle en général. En effet, les experts de la CIE effectuent une distinction entre les conditions contrôlées en laboratoire, et les conditions réelles de travail visuel. Ainsi, ils ont proposé une méthode qui permet d'obtenir, à partir d'une transposition des conditions de référence des expériences de Blackwell, des résultats qui auraient été trouvés chez une population moins exercée [Viénot, 1998].

Les recherches sur la vision ont montré qu'il existe, pour des conditions d'observation données, des valeurs limites du contraste en deçà desquelles il n'est plus possible de discerner le caractère du fond. Ce contraste de seuil C<sub>s</sub> dépend, pour une dimension et en un temps de présentation donnés du test, de la luminance du fond. On peut ainsi représenter graphiquement la relation entre le seuil de contraste et la luminance de fond, traduisant la limite de perception visuelle d'un caractère sur son fond. La courbe ainsi tracée est déduite des valeurs moyennes du seuil de visibilité (ou seuil de contraste) pour la tache visuelle de référence (limite de discernement d'un objet sur son fond) obtenues auprès d'un groupe de 68 observateurs normaux, agés de 20 à 30 ans [CIE, 1972]. On appelle cette représentation limite, le niveau de visibilité de référence, ou VL1 (VL pour Visibility Level) (voir figure 1.1). On définit le niveau de visibilité comme étant:

$$VL = \frac{C}{C_s}$$
, (éq. 1.3),

ainsi lorsque le contraste de la tâche vaut deux fois le contraste de seuil, alors VL=2. Cependant, cette perception aux limites correspond à une efficacité très réduite des performances visuelles, inacceptable dans la vie courante.

En pratique, on travaille à des niveaux de contraste supra-liminaires caractérisés par le concept de niveau de visibilité. Sur la figure 1.1, sont tracées, d'une part, la courbe correspondant au niveau de référence VL1, et d'autre part les courbes d'isoperformance VL8 et VL100, qui correspondent à des niveaux de performance différents. [AFE, 1997]

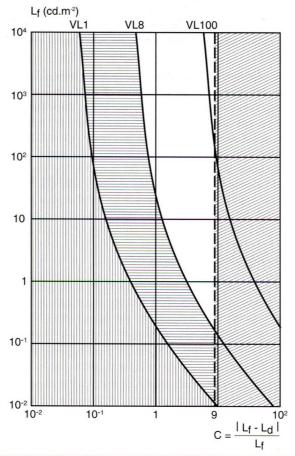


Fig. 5.1. Représentation sur l'abaque des niveaux de visibilité des zones correspondant aux :

performances optimales
performances difficiles
performances impossibles

Figure 1.1: Abaque des niveaux de visibilité déduits des travaux de Blackwell [AFE, 1997]

contrastes excessifs

Les travaux de Blackwell ont montré que la courbe VL8 est la limite du travail visuel pénible. C'est la courbe adoptée par la CIE pour la performance visuelle standard [AFE, 1997].

Le niveau VL8 correspond à un niveau de performance visuelle de 85%, les courbes de Blackwell, nous permettent de déduire les valeurs correspondant aux niveaux de visibilité inférieurs, ainsi que la performance relative à VL8 [Blackwell, 1946].

| Niveau de visibilité | Performance visuelle (%) | Performance visuelle relative à VL8 (%) |
|----------------------|--------------------------|---|
| VL8                  | 85                       | 100                                     |
| VL7                  | 81                       | 95                                      |
| VL6                  | 77                       | 91                                      |
| VL5                  | 73                       | 86                                      |
| VL4                  | 70                       | 82                                      |
| VL3                  | 57                       | 67                                      |
| VL2                  | 35                       | 41                                      |
| VL1                  | 11                       | 13                                      |

Table 1.2: Performance visuelle absolue et relative correspondant aux différents niveaux de visibilité

A présent, voyons comment appliquer ces résultats à une situation réelle de travail sur écran de visualisation, étant donné que les résultats de Blackwell peuvent être appliqués à n'importe quelle tache visuelle [Denieul, 1986].

Dans le cas d'un travail sur écran, la donnée fondamentale sera celle de la luminance de fond. De nos jours, la majorité des écrans est à contraste positif (caractère sombre sur fond clair), la luminance du détail de couleur foncée est relativement faible (1 ou 2 cd/m2). On considère alors comme situation de référence

la luminance dans le noir de l'écran, et le contraste vaut donc:  $C_0 = \frac{\left|L_{d0} - L_{f0}\right|}{L_{f0}}$  (éq.

1.4).

Dès qu'un éclairage supplémentaire est appliqué (naturel ou artificiel), l'écran reçoit l'appoint d'une luminance de voile (L<sub>v</sub>). La luminance de l'écran est donc plus élevée, et le contraste diminue. Celui-ci devient:

et le contraste diminue. Celui-ci devient: 
$$C_{v} = \frac{\left| (L_{d0} + L_{v}) - (L_{f0} + L_{v}) \right|}{(L_{f0} + L_{v})} = \frac{\left| L_{d0} - L_{f0} \right|}{(L_{f0} + L_{v})} \ (\acute{eq}. \ 1.5).$$

On sait que pour rester dans des conditions de performances visuelles satisfaisantes, il est déconseillé de se trouver à un niveau de visibilité inférieur à VL8. Ainsi, on peut déduire, connaissant les conditions initiales ( $L_{d0}$  et  $L_{f0}$ ), la valeur de la luminance de voile maximale acceptable permettant de rester dans des conditions visuelles satisfaisantes.

Cette valeur limite est déduite graphiquement des abaques de Blackwell. Les recommandations de l'AFE [AFE, 1997] nous indiquent la méthode suivante:

Sur l'abaque des niveaux de visibilité, les différentes valeurs du contraste C, lorsque l'on augmente la luminance de voile, sont situées sur une droite inclinée à  $-45^{\circ}$  à partir du point  $C_0$ . Comme il ne faut pas descendre en dessous de la courbe VL8 pour conserver une performance correcte, nous pouvons lire, sur l'abaque, directement la valeur maximale de la luminance du fond  $L_{f max}$  admissible et en déduire la valeur maximale de la luminance de voile:  $L_{V max} = L_{f max} - L_{f0}$ .

#### Remarque:

Afin de vérifier la provenance du fait que les valeurs du contraste sont situées sur une droite à  $-45^{\circ}$  quand on augmente la luminance de voile, il suffit d'exprimer la quantité  $\log(C_0)$ - $\log(C_v)$ , et de vérifier si elle est égale à  $\log(L_{f0}+L_v)$ - $\log(L_{f0})$ .

$$\log(C_0) - \log(C_v) = \log \frac{|L_{f0} - L_d|}{L_{f0}} - \log \frac{|L_{f0} - L_d|}{L_{f0} + L_v} = \log |L_{f0} + L_v| - \log(L_{f0})$$
(CQFD)

Exemple d'utilisation des abaques de Blackwell.

Considérons un écran de visualisation de bonne qualité, ayant une luminance dans le noir  $L_{f0}$ =70 cd/m². Le caractère de couleur noire a une faible luminace (1 ou 2 cd/m²), ainsi  $C_0$ =1. L'abaque nous permet de déduire la valeur de la luminance maximale acceptable sur l'écran permettant de rester dans des conditions de performances visuelles satisfaisantes. On lit la valeur de  $L_{f max} = L_{f0} + L_{v max} = 90$  cd/m², d'ou  $L_{v max} = 20$  cd/m². Voir figure 1.2.

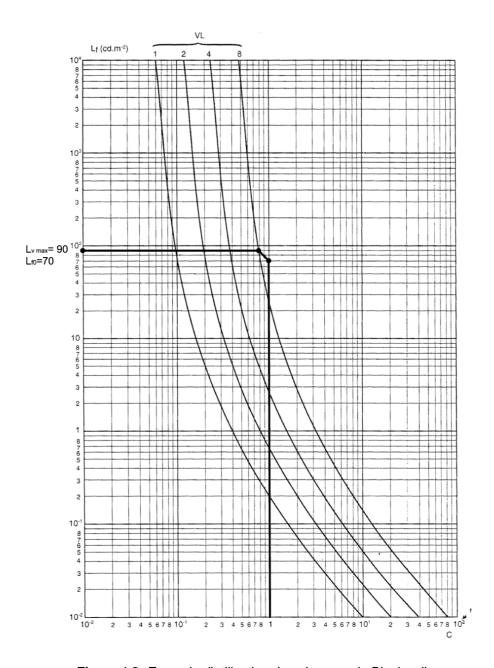


Figure 1.2: Exemple d'utilisation des abaques de Blackwell

Ainsi, si l'on considère l'écran comme une surface diffusante ayant un coefficient de réflexion de 10 % (valeur standard), l'éclairement d'appoint maximal tolérable sur l'écran vaut:  $E_{\max} = \frac{\pi \times L_{\text{vmax}}}{\rho_{\text{écran}}} = 628 \, \text{lux}$ .

A ce niveau, il est déjà aisé de réaliser que le paramètre luminance de fond joue un role capital dans la valeur de la quantité de lumière maximale acceptable sur l'écran. Par exemple si  $L_{f0}$ =40 cd/m², alors,  $L_{v\,max}$  = 5 cd/m² et  $E_{max}$ =157 lux.

Ces valeurs d'éclairement maximal sont rarement dépassées en éclairage artificiel (sauf dans le cas du reflet direct d'un luminaire sur l'écran), en revanche en éclairage naturel, l'éclairement vertical sur l'écran peut atteindre rapidement des valeurs élevées. En résumé, plus la luminance dans le noir de l'écran (L<sub>f0</sub>) est élevée, plus la tolérance à une quantité de lumière supplémentaire sera élevée. Autrement dit, pour le cas plus précis des protections solaires, on peut d'ores et déjà soumettre

l'hypothèse que plus la luminance dans le noir de l'écran est élevée, plus l'utilisateur tolèrera de lumière naturelle, et meilleures seront ses conditions de travail.

#### I.2.2.2. Rapports de luminances dans le champ de vision.

Dans les diverses recommandations d'éclairage, on trouve souvent la fameuse règle du "1:3:10". Le principe consiste à dire que les luminances du champ de vision d'un individu effectuant une tache de travail statique, doivent rester dans des rapports raisonnables afin de prévenir les situations d'éblouissement dû au trop fort contraste. Ainsi, il est recommandé [Rea, 1993] [CIBSE, 1994] [CIBSE, 1996] que les rapports de luminances n'excèdent pas les valeurs suivantes:

- Entre le papier et l'écran de visualisation: 3:1 ou 1:3
- Entre la tâche visuelle (écran ou papier) et les surface adjacentes: 3:1 ou 1:3
- Entre la tâche visuelle et les surfaces non-adjacentes: 10:1 ou 1:10

Certaines recommandations évoquent un rapport maximum entre la luminance de la tâche et le point le plus lumineux pouvant aller jusqu'à 40 [IES, 1977]. Il faudra cependant veiller à ce que cette zone à forte luminance n'occupe qu'une très petite partie du champ visuel. Nous reviendrons sur cette notion de surface occupée par la source lumineuse un peu plus loin.

La norme ISO 8995 [ISO, 1989] suggère que les rapports entre l'écran et l'entourage immédiat ne devraient pas être inférieurs au tiers de la luminance de l'écran. La norme AFNOR NF X 35-121 [AFNOR, 1987] évoque une tolérance légèrement plus élevée, elle suggère que les rapports entre la tâche visuelle, le contour proche et le reste du champ visuel restent dans des ratios 1:5:10.

Berrutto [Berrutto, 1996] soulève toutefois que l'origine de ces recommandations est assez floue. On trouve cependant l'origine des rapport 1:3:10 dans les travaux de Moon & Spencer [Moon, 1945], [Moon, 1948].

Leurs recherches nous indiquent que si la tâche visuelle a une valeur de 10, le champ de vision doit demeurer dans la gamme 3-30, et le fond dans la gamme 1-100, afin de garantir à l'individu des conditions de vision satisfaisantes. Hopkinson [Hopkinson, 1970] indique également, bien qu'il y ait une liberté non négligeable autour de ces valeurs moyennes, que l'on peut recommander que les rapports de luminance entre la tache, le contour et le fond restent dans un rapport 1:3:10. Une extension de cette gamme pourrait conduire à un éblouissement d'inconfort, à moins que des précautions exceptionnelles aient été prises dans l'installation d'éclairage. Ces résultats sont le fruit d'une série d'expérimentations longues à la Building Research Station en 1948.

Les expériences de Moon & Spencer et celles d'Hopkinson ont été menées indépendamment, le fait que les deux équipes aboutissent à des conclusions similaires, renforce la solidité de ces recommandations.

On trouve également chez Moon & Spencer [Moon, 1945] un lien entre la taille de la source éblouissante et le ratio toléré entre la tache visuelle et cette même source. Sur la table 1.3, on lit les valeurs des rapports de luminance en fonction de la taille de la source éblouissante.

| Angle solide (stéradians) | Rapport luminance mini | Rapport luminance maxi |
|---------------------------|------------------------|------------------------|
| 10 <sup>-6</sup>          | 0.00086                | 1170                   |
| 10 <sup>-5</sup>          | 0.0085                 | 118                    |
| 10 <sup>-4</sup>          | 0.079                  | 12.7                   |
| 5.4*10 <sup>-4</sup>      | 0.315                  | 3.17                   |
| Très large                | 0.333                  | 3.00                   |

**Table 1.3**: Gamme des rapports de luminance tolérables dans un champ de vision à répartition ailleurs uniforme, en fonction de la taille de la source éblouissante.

Les résultats de la table 1.3 nous montrent que moins la source éblouissante est grande, plus on tolérera qu'elle ait une luminance élevée. En effet, il ne s'agit pas d'appliquer les recommandations 1:3:10, sans se soucier de la surface du champ de vision occupée par la source éblouissante. Un simple faisceau et une grande surface lumineuse ne produiront pas la même gêne. Même si il a été observé que parfois, une petite source de luminance très élevée peut être perçue comme plus éblouissante qu'une source de grande taille de luminance identique [Sivak, 1991]. Newsham et al. [Newsham, 2001] ont observé que les rapports de luminance préférés par les occupants de bureaux sont corrélés avec les conditions lumineuses du reste de la journée. Les expériences de cette équipe ont montré que les rapports de luminance choisis par les occupants de bureaux peuvent aller jusque 1:20 dans le champ de vision, ce qui est très supérieur aux valeurs 1:3 de la plupart des standards. Ceci peut être expliqué par le fait que, dans cette expérience, le champ de vision considéré est plus large.

Ceci soulève probablement le point le plus incertain de toutes ces recommandations: quelles sont les zones considérées? Quelles sont les limites du champ de vision et du champ périphérique? La plupart des standards restent flous quant à la délimitation de ces zones. Certains auteurs [Dubois, 2001] rapportent des travaux précisant que le champ de vision est délimité par un cône d'ouverture de 60° au niveau de l'œil, et le champ périphérique par un cône de 120° d'angle d'ouverture. Les travaux de Loe [Loe, 1994] ne considèrent pas des cônes, mais une bande de

Les travaux de Loe [Loe, 1994] ne considérent pas des cônes, mais une bande de 40° de hauteur et de 90° de largeur, centrée au niv eau de l'œil. Ses conclusions indiquent également qu'il existe une forte corrélation entre les rapports de luminance préférés et l'intérêt visuel de la scène. Autrement dit, plus la scène est visuellement intéressante, plus les rapports de luminance tolérés seront élevés. En moyenne, lorsque la scène est jugée intéressante, le rapport est de 1:13, avec un minimum de luminance de 40 cd/ m². La gamme observée est large, les rapports peuvent varier entre 10 et 50.

#### 1.2.2.3. Conclusions sur la quantification de l'éblouissement d'incapacité.

Toutes les expériences mentionnées plus haut ont été réalisées en éclairage artificiel dans des environnements variés. Comme l'a suggéré Loe [Loe, 1994] la tolérance à l'éblouissement est corrélée avec l'intérêt visuel de la scène, autrement dit, la présence d'une fenêtre dans l'environnement risque d'augmenter l'agrément d'un

espace de travail, par conséquent, la tolérance à l'éblouissement sera plus élevée en éclairage naturel. Cette observation est très souvent citée.

D'autre part, il semble que l'éblouissement perçu soit également corrélé avec la tache effectuée [Sivak, 1991], autrement dit il est très difficile de proposer des standards concernant la répartition idéale des luminances.

C'est pourquoi, même si le ratio le mieux adapté aux différentes activités n'est pas encore clairement établi, la règle des ratios 1:3:10, qui est la plus répandue aujourd'hui, est probablement bien trop sévère et restrictive.

# I.2.3. Eblouissement d'inconfort

L'éblouissement d'inconfort, à la différence de l'éblouissement d'incapacité, est un phénomène subjectif. Par conséquent, comme toute sensation, c'est une donnée difficile à quantifier.

Cependant, de nombreuse équipes de recherches se sont attachées à essayer d'en comprendre les fondements.

Les expériences menées ont abouti à diverses formules d'éblouissement d'inconfort, qui fournissent une valeur d'indice d'éblouissement. Cependant la majorité des formules existantes ont été établies à l'aide d'observations faites sur l'éblouissement dû à de petites sources artificielles. C'est le cas du Building Research Station Glare Index (BGI), le Visual Comfort Probability (VCP), et l'Unified Glare Rating (UGR) [Velds, 1999].

L'éblouissement d'inconfort résulte d'une répartition défavorable des luminances dans le champ de vision, ou bien de luminances trop élevées. Les formules d'évaluation de l'éblouissement d'inconfort devront donc tenir compte des luminances du champ de vision, de la taille, et bien entendu, de la valeur de la luminance des sources éblouissantes.

La formule de Cornell a été établie pour évaluer l'éblouissement d'inconfort dû à des sources artificielles de grande dimension. C'est une version modifiée du BGI. Des sujets entraînés, ont évalué la sensation d'éblouissement due à une large source composée de tubes fluorescents placés derrière un vitrage diffusant. Le degré d'éblouissement (GI, pour Glare Index) perçu a été modélisé comme suit :

$$GI = 10 \log \left| 0.478 \left\{ \frac{L_s^{1.6} \times \Omega^{0.8}}{L_h + (0.07 \,\omega^{0.5} \times L_s)} \right\} \right| (\acute{e}q. \ 1.6).$$

Où:

Ls est la luminance de la source (cd/ m²)

Lb est la luminance moyenne du fond sans la luminance de la source éblouissante  $(cd/m^2)$ 

west l'angle solide sous tendu par la source (sr)

 $\Omega$ est l'angle solide sous tendu par la source, modifié selon sa position dans le champ de vision à l'aide de l'indice de position de Guth p.

$$\Omega = \int \frac{d\omega_{\rm s}}{p^2}$$

Les valeurs fournies par le GI, sont associées aux sensations suivantes :

| Degré d'éblouissement perçu       | GI   |
|-----------------------------------|------|
| Juste perceptible                 | 10   |
| Juste acceptable                  | 16   |
| Limite entre confort et inconfort | 18.5 |
| Juste inconfortable               | 22   |
| Juste intolérable                 | 28   |

Table 1.4: Sensations d'éblouissement correspondant aux différentes valeurs de GI

Cette formule a été validée à l'aide d'expériences in-situ menées dans des salles de classe et des hôpitaux [Velds, 1999]. Les sensations d'éblouissement ressenties ont été comparées à une formule légèrement modifiée de l'indice de Cornell (GI), l'indice utilisé dans ce cas était le Daylight Glare Index (DGI) qui est adapté aux situations d'éclairage naturel. Il s'exprime comme suit :

$$DGI = 10 \log 0.478 \left\{ \frac{L_{sky}^{1.6} \times \Omega^{0.8}}{L_b + (0.07\omega^{0.5} \times L_{wp})} \right\}$$
 (éq. 1.7).

Où:

L<sub>sky</sub> est la luminance du ciel vue à travers la fenêtre (cd/ m²)

 $L_b$  est la luminance du fond, moyenne des luminances des surfaces à l'intérieur de la pièce (cd/  $m^2$ )

L<sub>wp</sub> est la luminance dans le plan de la fenêtre (cd/ m²) ωest l'angle solide sous tendu par la source (sr)

 $\Omega$ est l'angle solide sous tendu par la source, modifié selon sa position dans le champ de vision à l'aide de l'indice de position de Guth p.

Il a été observé dans un second temps, que comparativement aux valeurs limites données par le GI, il existe une tolérance à l'éblouissement en éclairage naturel plus élevée qu'en éclairage artificiel, pour des degrés moyens d'inconfort. Par exemple la limite entre confort et inconfort n'est plus estimée à 18.5 (valeur déduite des expériences ayant abouti à l'élaboration du GI), mais à 22. Ainsi, une relation numérique a été établie entre les indices permettant d'évaluer l'inconfort en éclairage artificiel et en éclairage naturel :

$$DGI = \frac{2}{3}(GI + 14)$$

| Degré d'éblouissement perçu       | GI   | DGI |
|-----------------------------------|------|-----|
| Juste perceptible                 | 10   | 16  |
| Juste acceptable                  | 16   | 20  |
| Limite entre confort et inconfort | 18.5 | 22  |
| Juste inconfortable               | 22   | 24  |
| Juste intolérable                 | 28   | 28  |

Table 1.5: Correspondance entre les valeurs du GI et du DGI

De nombreuses validations à l'aide d'expériences sur l'éblouissement dû aux fenêtres ont été menées. Ce qui nous amène à présent à évoquer les limites de ces méthodes d'évaluation de l'éblouissement d'inconfort.

#### I.2.4. Eblouissement dû aux fenêtres.

Avant d'aborder la notion d'éblouissement dû aux fenêtres, il est important de rappeler l'aspect reposant qu'a une fenêtre sur l'oeil. En effet, pour un œil normal, lorsque le cristallin est au repos, les images des objets situés à l'infini se forment sur la rétine : on dit alors que l'œil n'accommode pas. C'est pourquoi, lorsque que l'on dispose d'une vue vers l'extérieur depuis son poste de travail, nous pouvons offrir à notre œil une vue vers des points éloignés (à l'infini pour l'œil), c'est-à-dire des périodes de repos nécessaires dans le cadre d'un travail sur écran prolongé. En revanche, lorsque l'œil regarde un objet proche, son cristallin se contracte, ce qui change la distance focale et permet aux images de se former sur la rétine : on dit alors que l'œil accommode. La rétine ne changeant pas de place, c'est en accommodant (c'est-à-dire en contractant le cristallin) que l'on arrive à avoir une image nette sur la rétine. Cette action d'accommodation est à long terme fatigante pour l'œil, d'où l'avantage de disposer d'une fenêtre dans son bureau afin pouvoir regarder à l'extérieur pour reposer son système visuel.

Les fenêtres sont une source d'éblouissement potentiel, étant donné qu'elles peuvent occuper une large partie du champ visuel, à l'inverse des sources d'éclairage artificiel qui sont la plupart du temps situées au-dessus de la tête. L'intérêt d'une fenêtre est de laisser pénétrer la lumière à l'intérieur d'un local et également de fournir une vue, un contact, vers l'extérieur [Chauvel, 1983] [Boubekri, 1991]. Et c'est cette notion de vue vers l'extérieur qui va nous amener à considérer les fenêtres différemment des sources d'éclairage artificiel. En effet, ce phénomène implique une tolérance à l'éblouissement en éclairage naturel plus élevée qu'en éclairage artificiel.

Les différents indices d'éblouissement d'inconfort mentionnés plus haut, à l'exception du DGI, ont été établis à l'aide d'expériences menées en éclairage artificiel, ainsi leur validité en éclairage naturel n'est pas induite.

La majorité des indices de confort visuel ne sont pas applicables en éclairage naturel. En effet, les indices donnent dans ce cas des valeurs d'éblouissement élevées, car les formules ne tiennent pas compte du fait que l'effet dû à l'augmentation de la taille de la surface éblouissante est contre-balancé par l'augmentation des effets d'adaptation [Chauvel, 1983].

Plusieurs équipes de recherche ont montré que les indices de confort visuel ne sont pas applicables en situation d'éclairage naturel.

Iwata [Iwata, 1991] a montré que le DGI ne convient pas pour caractériser l'éblouissement dû à une source de grandes dimensions. Les expériences menées par Osterhaus [Osterhaus, 1998] indiquent également que le DGI n'est pas adapté pour traduire l'éblouissement perçu par des utilisateurs faisant face à une surface de grande dimension. Ces expériences ont cependant été réalisées à l'aide de sources d'éclairage artificiel, par conséquent l'effet de contact vers l'extérieur qui induit une tolérance plus élevée à l'éblouissement est omis ici.

Boubekri [Boubekri, 1991] a mis en évidence le fait que l'éblouissement dû à une fenêtre de taille moyenne est plus important que celui dû à une fenêtre de petite ou grande taille. Il a également montré que la taille de la baie est corrélée avec la position de l'utilisateur par rapport à celle-ci en termes de perception

d'éblouissement. En effet, si l'on compare les sensations d'éblouissement perçues par un utilisateur face à une baie et un autre placé perpendiculairement, les analyses statistiques mettent en évidence le fait que lorsque l'on fait face à la baie, sa taille a une importance dans la perception de l'éblouissement, en revanche si l'on est situé perpendiculairement, la sensation sera identique quelle que soit la taille de la fenêtre. Le VCP, l'UGR et le BGI ont été élaborés pour de petites sources inférieures à 0.01 stéradians, ce qui correspond à une surface lumineuse de 10 cm sur 10 cm, vue à une distance de 1 m. Autrement dit, ices indices ne sont pas applicable à des fenêtres de taille normale.

Et finalement, les recherches ont montré que pour des degrés moyens d'inconfort visuel, la luminance du ciel vu à travers une baie peut être plus élevée, à taille égale, qu'une source artificielle pour percevoir le même degré d'inconfort visuel. Autrement dit, la tolérance à l'éblouissement en éclairage naturel est plus élevée qu'en éclairage artificiel [Velds, 1999].

En ce qui concerne le cas du soleil direct qui pénètre à l'intérieur d'une pièce, il est difficile de donner des règles strictes. En effet, si le rayonnement solaire direct pénètre à l'intérieur de la rétine directement, la sensation d'éblouissement sera instantanée, en revanche, si ça n'est pas le cas, la quantification de la gêne sera plus complexe. Le rayonnement direct peut également avoir un effet bénéfique, il peut redonner de l'énergie. La sensation du soleil sur la peau peut être perçue de manière extrêmement différente par deux utilisateurs. Quoiqu'il en soit, à l'heure actuelle, la question de savoir si la tolérance à l'éblouissement est la même sous conditions de rayonnement direct ou diffus reste sans réponse [Boubekri, 1991].

# I.3. Notions d'ergonomie.

# I.3.1. Définitions & généralités.

Selon l'Association Internationale d'Ergonomie, l'ergonomie (ou l'étude des facteurs humains) est la discipline scientifique qui vise la compréhension fondamentale des interactions entre les êtres humains et les autres composantes d'un système, et la mise en œuvre dans la conception de théories, de principes, de méthodes et de données pertinentes afin d'améliorer le bien-être des hommes et l'efficacité globale des systèmes.

L'ergonomie est née après la seconde guerre mondiale pour des raisons sociales et économiques. Sociales, pour objectiver, puis améliorer les conditions de travail, et par là même, la santé, la sécurité, le bien être et le confort. Économiques, parce que les conditions de travail ne peuvent pas être envisagées en dehors des critères de production, de performance et d'efficacité [Kandaroun, 1986].

Son nom provenant du grec ergon (travail) et nomos (lois) pour la désigner la science du travail, l'ergonomie est une discipline qui utilise une approche systémique dans l'étude de tous les aspects de l'activité humaine. L'ergonomie préconise une approche qui tient compte de facteurs physiques, cognitifs, sociaux, organisationnels, environnementaux et autres.

Les ergonomes contribuent à la conception et à l'évaluation des tâches, du travail, des produits, des environnements et des systèmes en vue de les rendre compatibles avec les besoins, les compétences et les limites des personnes [AIE, 2002].

La thématique qui nous intéresse ici est l'ergonomie au poste de travail, et plus particulièrement l'ergonomie sur l'écran de visualisation.

# I.3.2. Ergonomie au poste de travail.

De nombreuses recommandations existent sur l'aménagement de l'espace de travail. Et la présence d'un écran de visualisation est un élément à prendre en compte dans la caractérisation de l'ergonomie au poste de travail.

Concernant l'éclairage artificiel, il est recommandé que les sources ne puissent être vue directement sous un angle inférieur à 30° vers le haut.

En 1992, l'Association de Recherche sur la Vision et le travail sur Ecran de Visualisation (ARVEV) [ARVEV, 1992] a publié une enquête menée auprès de 340 personnes entre 1981 et 1990 dans le but d'étudier le lien entre la fatigue et la gêne due au travail sur écran et les paramètres ergonomiques (position de l'écran, nombre de fenêtres dans la pièce, clarté des murs, etc...).

Certains résultats fournissent des indications intéressantes :

- 91.9 % des bureaux contiennent au moins une fenêtre.
- 65.5 % des vitrages utilisés étaient clairs et 34.5 % sont teintés. Il a été observé que l'éclairage inadéquat, facteur de gêne ou de fatigue, est associé à la présence de vitres claires. Les vitres teintées permettent de réduire la sensation d'inconfort visuel. Remarque importante : ces enquêtes ont été menées à Marseille, d'autres expériences, sous des climats moins ensoleillés, ont mis en évidence un rejet par le personnel des vitres teintées. La préoccupation météorologique de notre projet est corroborée par ce genre d'observations.
- 39.9 % du personnel travaille sur écran principalement en éclairage naturel.
- Les reflets sur l'écran sont un facteur de gêne ou de fatigue pour 53.9 % des employés. L'observation des postes de travail a montré que 69.7 % des écrans présentaient des reflets gênants (provenant de sources d'éclairage naturel ou artificiel).

Nota: Dans le cadre de ces enquêtes, 95.5 % des écrans présentaient des caractères lumineux (vert) sur un fond sombre (noir). Etant donné que les réflexions sont plus importantes sur fond sombre que sur fond foncé, les résultats ne pourront être appliqués à la situation d'écrans actuels, bénéficiant de fonds clairs.

Afin d'éviter les reflets sur l'écran, il est recommandé de le disposer perpendiculairement à la source d'éclairage naturel. Mais en pratique, on trouve parfois des situations aberrantes comme des écrans faisant face à la baie. Les occupants de bureau sont souvent tributaires de l'espace et ils ne peuvent pas toujours aménager leur bureau comme ils le souhaiteraient.

# I.4. Critères de confort et performance visuels à valider.

Nous avons énoncé les différents critères de confort et de performance visuels qui existent à l'heure actuelle. Nous avons également soulevé les problèmes que posent leur manque de validation aussi, nous proposons ici une tentative de validation de certains de ces critères. En effet, afin de pouvoir mieux caractériser le confort visuel au poste de travail, nous avons retenu quelques critères qui nous semblaient d'une importance certaine. Nous rappelons ici que la finalité de ce travail est de pouvoir proposer une loi de commande simplifiée de stores vénitiens, s'appuyant sur des considérations physiques de fonction de transfert de stores vénitiens (voir chapitre suivant), ainsi que sur des conclusions comportementales tirées d'une campagne de mesure in-situ visant à comprendre l'attitude d'un individu travaillant sur écran de visualisation, face à sa protection solaire. Parmi les hypothèses testées (détaillées dans la 3ème partie), quelques unes s'attacheront à valider certains des critères de confort énoncés plus haut.

#### A. Luminance de voile sur l'écran.

Les théories de Blackwell sur les niveaux de visibilité reposent sur des expérimentations solides et les conclusions, trop peu utilisées à l'heure actuelle dès lors qu'il s'agit de parler de confort visuel au poste de travail, méritent une validation sur le terrain.

Il paraît pertinent que la luminance dans le noir d'un écran est un bon indicateur des conditions de visibilité d'un utilisateur. Aussi nous allons nous attacher à vérifier dans quelle mesure la luminance de voile maximale théorique, dont le principe est détaillé précédemment, est respectée par les utilisateurs. A l'aide de l'analyse des mesures d'éclairement sur l'écran du panel de sujet que nous avons testés, nous verrons la tolérance appliquée à ces recommandations.

Les utilisateurs ayant la possibilité de contrôler l'apport lumineux sur leur écran, nous verrons la limite de cette valeur telle qu'elle est décidée par les utilisateurs en fonction des paramètres initiaux de leur écran.

# B. Rapports de luminance dans le champ de vision.

La célèbre règle des ratios 1 :3 :10 est-elle appliquée intuitivement par un individu lorsqu'il travaille sur son écran, ou bien la tolérance est-elle plus grande ?

Les recherches de Newscham [Newsham, 2001] et de Loe [Loe, 1994] tendent à prouver que l'on peut supporter des rapports bien supérieurs. Qu'en est-il lorsque l'on analyse le comportement d'individu sur le lieu de travail?

A l'aide de cartographies de luminances établies au cours de journées types, nous pourrons voir dans quelles mesures ces rapports de luminances caractérisent le confort visuel.

#### C. Indices de confort visuel.

Même si les indices tels que le DGI et l'UGR ont été établis par certaines recherches [Osterhaus, 1998] [Velds, 1999] comme étant peu représentatifs du ressenti des individus, nous allons tenter de tester, toujours à l'aide des cartographies de luminance, leur cohérence avec les choix des individus.

Ce sont ces trois critères que nous allons vérifier. Deux d'entre eux seront inclus à la loi de commande des stores vénitiens, la luminance de voile et les rapports de luminance. Les indices de confort visuels ne sont pas facilement implémentables en l'état à l'intérieur d'un automatisme de commande de stores car ils nécessitent des calculs complexes et une quantité de données trop importante.

Avant ces validations sur le terrain, nous allons nous intéresser, dans le chapitre suivant, à la fonction de transfert lumineux d'un store vénitien afin de pouvoir prédire quelles seront les positions de stores les plus adaptées permettant de remplir les critères retenus.

# **Chapitre 2**

Stores vénitiens : fonction de transfert et modèle d'utilisation.

Maintenant que nous avons passé en revue, et retenu pour validation, des critères de confort et de performance visuelle, nous allons proposer une modélisation de ceux-ci. Nous souhaitons aboutir à un modèle capable de prédire la position du store la plus adaptée, tenant compte de la fonction de transfert du store vénitien et des critères de confort visuel.

Le plus difficile pour les techniciens de la baie reste de mettre en pratique les critères de confort visuel détaillés dans le chapitre précédent. Les indices de confort visuel, comme le Daylight Glare Index, n'étant pas aisés de manipulation, sont souvent boudés par les industriels.

Nous allons essayons ici de proposer un outil de pilotage de stores vénitiens qui permet de garantir à un utilisateur de bureau des conditions de confort et de performance visuelle optimales grâce à une action automatisée de la protection solaire. Les consignes de pilotage du store tiendront compte, d'une part, des critères de confort visuel que nous avons retenus, et d'autre part de la position du soleil, les stores vénitiens étant pilotés de manière à empécher le rayonnement solaire direct de pénétrer à l'intérieur du local.

La démarche analytique que nous nous proposons d'adopter ici consiste à effectuer une caractérisation optique empirique de stores vénitiens dans un premier temps. Dans un second temps, nous modélisons les deux critères de confort visuel que nous avons retenus (mais qui restent néanmoins à valider à l'aide de la campagne de mesures qui sera exposée dans le chapitre 3).

# II.1. Caractérisation optique de stores vénitiens.

# II.1.1. Introduction

La caractérisation optique d'un store vénitien est un exercice fastidieux. Pour caractériser de manière exhaustive un tel système, la méthode la plus précise reste celle dite du calcul de la Bi-directional Transmission Distribution Function (BTDF), qui correspond à un calcul amélioré du coefficient de luminance [CIE, 1987]. La BTDF est définie comme étant le rapport entre la luminance d'un élément du matériau dans une direction donnée de l'hémisphère de transmission et l'éclairement incident dû à une source ponctuelle ayant une position précise.

Dans le cas d'un store vénitien, la procédure pour effectuer ce type de caractérisation est complexe et nécessite un dispositif expérimental spécifique. En effet, pour ce type de caractérisation photométrique il faut utiliser un goniophotomètre tri-dimensionnel. Quoi qu'il en soit, dans notre cas, ce type de modélisation n'était pas simple à réaliser. D'autre part un tel niveau de finesse ne semblait pas nécessaire étant donné que l'on ne cherche pas à fournir un modèle précis de transmission optique d'un store vénitien, mais une estimation permettant de pouvoir prédire des positions du store satisfaisant certains critères de confort visuel.

Quelques équipes de recherche ont proposé des modèles de transmission lumineuse de stores vénitiens. Al-Shareef [Al-Shareef, 2001] a élaboré une

modélisation de systèmes à lames parallèles, mais ce modèle, trop spécifique, ne pouvait pas s'appliquer en l'état à notre cas.

Breitenbach. [Breitenbach, 2001] propose de caractériser les fonctions de transfert de systèmes de protections solaires à lames parallèles insérées à l'intérieur de vitrages. Il fournit en conclusion une relation permettant de caractériser le facteur de transmission d'un store vénitien en fonction des coefficients de réflexion spéculaire et diffus des lames du store et du nombre de réflexions ayant lieu entre les lames du store. Cette méthode proposée par Breitenbach fourni une fonction de transfert hémisphérique-hémisphérique du store vénitien, or nous verrons par la suite que nous avons également besoin d'avoir accès à la répartition des luminances dans l'espace de transmission.

Les modélisations précédemment proposées dans la littérature ne correspondant pas tout à fait à notre problématique, nous avons préféré établir une modélisation empirique spécifique. Il faut garder en mémoire que ce nous cherchons à faire ici est à fournir un outil de prédiction de la position idéale de stores vénitiens en fonction de leurs caractéristiques, dans le but d'automatiser les protections solaires motorisées, et non pas à fournir un modèle précis de BTDF de stores vénitiens. C'est pourquoi nous procéderons à une caractérisation optique empirique du store vénitien, afin de connaître sa fonction de transfert, répondant exactement à nos besoins. Autrement dit, la valeur de l'éclairement en un point de la pièce, ainsi que les valeurs des luminances maximales se trouvant dans le champ de vision du sujet travaillant sur écran de visualisation, quelles que soient l'inclinaison, la couleur des lames ou encore la géométrie et la photométrie de la pièce.

# II.1.2. Principe de la modélisation empirique.

L'idée est d'obtenir, dans un premier temps, la répartition des luminances sur un mur perpendiculaire à une baie équipée d'un store vénitien. Voir le point de vue sur la figure 2.1.



Figure 2.1 : Point de prise de des photos

La cellule test a été aménagée de manière à ce que le minimum de réflexions internes viennent perturber la luminance du mur due au rayonnement provenant de la baie. En conséquence les parois, à l'exception du mur face à l'objectif, ont été recouvertes d'un tissu noir. Voir figure 2.2.



**Figure 2.2 :** Aménagement de la cellule test pour la prise de photos (à gauche : configuration originale, à droite : cellule aménagée)

Pour des conditions lumineuses extérieures stables (ciel couvert, éclairement sur la baie constant et ciel clair avec rayonnement solaire direct sur la baie) nous avons effectué neuf photographies du mur perpendiculaire à la baie. Chacune de ces neuf scènes correspond à une inclinaison des lames du store précise (voir table 2.1). Nous plaçons l'objectif perpendiculairement à la baie, de manière à photographier le mur en face

Ces scènes seront finalement traitées de manière à attribuer à chaque pixel la valeur de la luminance correspondante [Dumortier, 2001]. La trace laissée par la lumière sur le mur nous donne l'indicatrice des luminances pour le store vénitien pour chaque inclinaison des lames.

De la valeur de luminance, connaissant le coefficient de réflexion du mur et en le supposant comme surface diffusante, on obtient la valeur de l'éclairement en un point du mur.

Etant donné que nous nous intéressons au cas du travail sur écran de visualisation, nous avons calculé la valeur de l'éclairement sur le mur à hauteur d'écran (voir la règle sur la figure 2.1). Ainsi, connaissant la valeur de l'éclairement vertical sur la baie, il est possible d'établir la valeur de la fonction de transfert du store vénitien, correspondant à un écran situé perpendiculairement à la baie, pour chaque inclinaison des lames envisagée.

Le but de cette manipulation est de pouvoir au final calculer la luminance de voile sur l'écran ainsi que la valeur des rapports de luminance dans le champ de vision.

# II.1.3. Principe du traitement des images.

Après traitement des photos (à l'aide du logiciel Photolux développé à l'ENTPE [Dumortier, 2001]), nous obtenons une cartographie des luminances pour chacune des scènes (voir exemple de traitement d'une image par Photolux sur la figure 2.3). Le programme Photolux permet de traiter une photographie prise avec un appareil numérique (de type spécifique) et d'établir sa cartographie de luminance. En effet, l'étalonnage en luminance de l'appareil numérique a permis de déterminer la relation entre la luminance réelle et la luminance de pixel pour chaque réglage d'exposition utilisé. Le programme de traitement des images applique ces formules à chacun des pixels de la prise de vue à traiter, après l'avoir traduite en mode colorimétrique CIE-Lab (ce qui permet de séparer pour chaque pixel l'information de luminance de l'information de couleur).

La répartition lumineuse obtenue pour chaque scène est ensuite traduite en termes de couleurs : chacune d'elles correspond à une valeur de luminance qui est repérée sur une échelle graduée. Selon le réglage d'exposition utilisé lors de la prise de vue, le capteur CCD de l'appareil numérique peut saturer pour les pixels exposés à des luminances élevées. Dans ces zones, l'information de luminance fournie est alors faussée, c'est pourquoi le programme blanchit automatiquement les zones correspondant à des luminances de pixel supérieures à une valeur seuil, dépendante du réglage d'exposition [Coutelier, 2001]. Voir exemple figure 2.3.

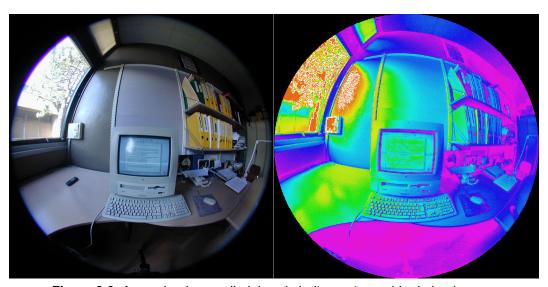


Figure 2.3: A gauche: image d'origine, à droite: cartographie de luminances

# II.1.4. Fonction de transfert du store vénitien

# II.1.4.1. Cas du ciel couvert ou clair sans rayonnement solaire direct.

L'indicatrice des luminances obtenue pour cette situation de ciel couvert peut être appliquée à différents niveaux d'éclairement vertical extérieurs (cf. méthode des facteurs de lumière du jour).

Sur une durée très courte (de l'ordre de la minute), donc pour un éclairement vertical extérieur constant, une série de photos du mur perpendiculaire à la fenêtre a été réalisée pour différentes inclinaisons des lames. Après analyse de ces photos en luminance, on obtient la répartition des luminances transmises par le store vénitien dans un plan vertical (le mur perpendiculaire à la fenêtre). Connaissant la valeur de l'éclairement vertical extérieur, on peut tracer des courbes d'iso-luminances. Voir figure 2.4.

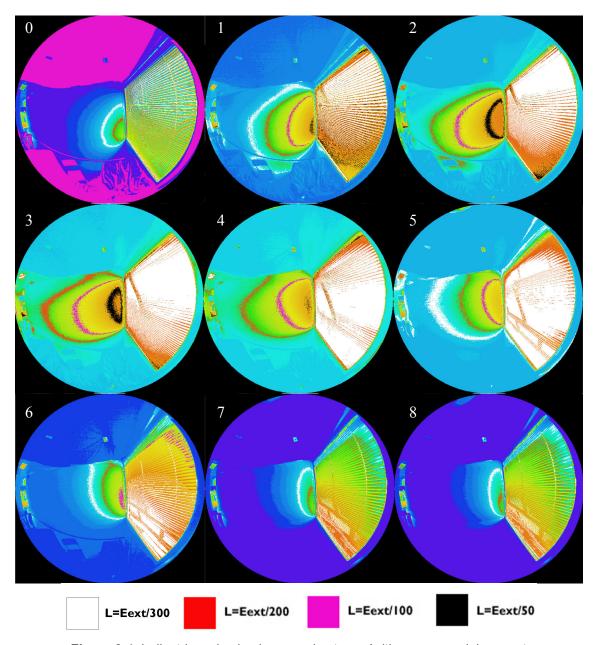


Figure 2.4: Indicatrices des luminances du store vénitien pour un ciel couvert.

Les positions 0 à 8 (de haut en bas, de gauche à droite) correspondent aux inclinaisons des lames détaillées sur la table 2.1. Voir figure 2.5 pour l'origine des angles.

| Position           | 0   | 1   | 2   | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| Angle $\alpha$ (°) | 145 | 135 | 125 | 105 | 90 | 70 | 55 | 35 | 25 |

Table 2.1 : Angles correspondant aux positions 0 à 8

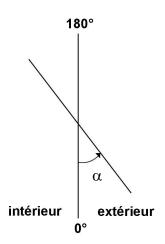
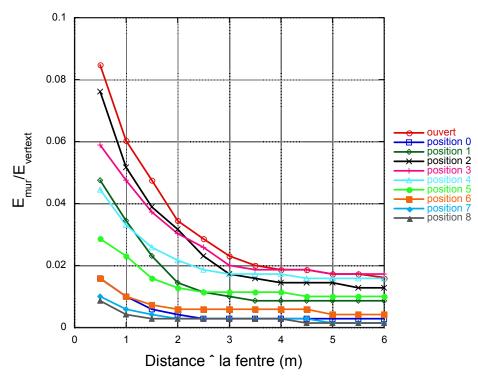


Figure 2.5: Repère des inclinaisons des lames

La finalité de cet exercice est de pouvoir connaître la valeur de la luminance de voile sur un écran d'ordinateur situé perpendiculairement à la baie ainsi que la valeur des rapports de luminance entre les différentes zones du champ de vision. On considère que l'écran est placé à une hauteur de 1.2m. On relève donc sur les images en fausses couleurs, les valeurs des luminances sur le mur à cette hauteur, tous les 50 cm en partant de la fenêtre (voir la règle sur la figure 2.1), pour les différentes inclinaisons des lames. Connaissant le coefficient de réflexion du mur (81 %) et en appliquant la loi de Lambert, on obtient la valeur de l'éclairement direct sur le mur. On peut ainsi tracer la variation du rapport entre l'éclairement vertical extérieur et l'éclairement sur l'écran en fonction de la distance à la baie, pour chacune des inclinaisons des lames (voir figure 2.6).



**Figure 2.6**: Fonctions de transfert pour différentes inclinaisons des lames en absence de rayonnement solaire direct

Durant la période de mesures, l'éclairement sur la baie valait moins de 3000 lux. C'est pour cette raison que les valeurs de l'éclairement sur le mur à l'intérieur de la cellule sont peu précises dès lors que l'on est éloigné de la baie (à plus de 2.5 m) et aussi si les lames sont très inclinées. Nous verrons plus loin le manque de précision que ces conditions de mesures ont engendré sur les résultats de la fonction de transfert.

Il est également possible de représenter la variation du rapport entre l'éclairement sur le mur et l'éclairement sur la baie en fonction de l'angle d'inclinaison des lames, pour chaque distance à la baie, par pas de 0.5 mètre (voir figure 2.7).

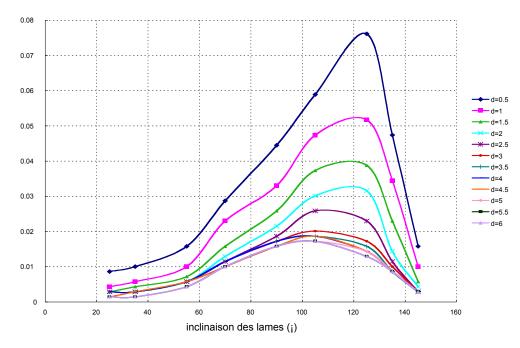


Figure 2.7: Variation du rapport Emur/Eext en fonction de l'inclinaison des lames.

La modélisation associée à ces différentes configurations est présentée sur la table 2.2. On ne donne la modélisation que pour un angle d'inclinaison des lames inférieur à 90°. En effet, nous verrons dans le chapitre suivant que les inclinaisons de lames supérieures à 90° ne sont que très peu sélectionnées par les individus (moins de 5 % du temps), par conséquent, il ne paraît pas utile d'inclure ces positions du store vénitien dans la modélisation.

|     | α<55°  | α>55°   |
|-----|--|---|
| 0.5 | $E_{mur} = (0.000246 \times \alpha - 0.00205) \times E_{vertext}$  | $E_{mur} = (0.000819 \times \alpha - 0.029) \times E_{vertext}$   |
| 0.5 | $(R^2=0.9796)$   | $(R^2=0.9994)$  |
| 1   | $E_{mur} = (0.000195 \times \alpha - 0.00077) \times E_{vertext}$  | $E_{mur} = (0.000648 \times \alpha - 0.0244) \times E_{vertext}$  |
| ı   | $(R^2=0.9918)$   | $(R^2=0.9764)$  |
| 1.5 | $E_{mur} = (0.000144 \times \alpha - 0.000718) \times E_{vertext}$ | $E_{mur} = (0.000532 \times \alpha - 0.0218) \times E_{vertext}$  |
| 1.5 | $(R^2=1)$  | $(R^2=9986)$  |
| 2   |  | $E_{mur} = (0.00045 \times \alpha - 0.01887) \times E_{vertext}$  |
| 2   |  | $(R^2=0.9991)$  |
| 2.5 | $E_{mur} = (0.000109 \times \alpha - 0.000445) \times E_{vertext}$ |   |
| 3   | $(R^2=0.9318)$   | $E_{mur} = (0.000337 \times \alpha - 0.01253) \times E_{vertext}$ |
| 3.5 | (K -0.9318)  | $(R^2=0.9958)$  |
| 4   |  |   |
| 4.5 |  | $E_{mur} = (0.000316 \times \alpha - 0.0125) \times E_{vertext}$  |
| 5   | $E_{mur} = (0.000103 \times \alpha - 0.00154) \times E_{vertext}$  | $(R^2=996)$   |
| 5.5 | $(R^2=0.8929)$   | (K -990)  |

**Table 2.2**: Modélisation des fonctions de transfert du store vénitiens en absence de rayonnement solaire direct sur la baie, en fonction de la distance à la baie et de l'inclinaison des lames.

On considère, d'après les précautions prises durant les mesures, que les réflexions internes sont absentes de cette modélisation. C'est pourquoi on rajoutera une composante réfléchie interne, donnée par la formule des réflexions multiples à l'intérieur d'une cavité. C'est la composante réfléchie interne moyenne du facteur de lumière du jour :

$$FRI = \frac{S_{v}}{S_{t}} \times \frac{\overline{\rho}\tau_{v}\tau_{h-h}(\alpha)}{(1-\overline{\rho})} \times \frac{E_{v}}{E_{hz}} \quad (éq. \ 2.1).$$

où: S<sub>v</sub> est la surface vitrée

St est la surface totale de la cavité

 $\rho$  est le coefficient de réflexion moyen des parois

 $\tau_{v}$  est le facteur de transmission du vitrage

 $\tau_{h-h}(\alpha)$  est le facteur de transmission hémisphérique-hémisqphérique du store vénitien (calcul détaillé dans le paragraphe 1.5)

E<sub>v</sub> est l'éclairement vertical sur la baie

E<sub>hz</sub> est l'éclairement horizontal extérieur

Cependant, la donnée dont on dispose ici est l'éclairement vertical sur la baie, c'est pourquoi on adapte cette formule de manière à obtenir la valeur de l'éclairement moyen rajouté sur les parois suite aux réflexions internes. (E<sub>RI</sub>)

$$FRI = \frac{E_{RI}}{E_{hz}} = \frac{E_{RI}}{E_{v}} \times \frac{E_{v}}{E_{hz}}$$
 (éq.2.2).

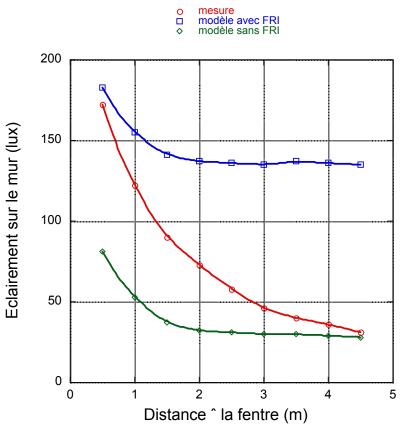
D'où : 
$$E_{RI} = \frac{S_v}{S_t} \times \frac{\overline{\rho}\tau_v \tau_{h-h}(\alpha)}{(1-\overline{\rho})} \times E_v$$
 (éq. 2.3).

Il faudra donc, en théorie, rajouter cette valeur à la composante directe déduite des équations précédentes.

L'équation 2.3 nous dit que la composante réfléchie interne de l'éclairement total en un point quelconque d'un espace est constante. Il se trouve que dans la pratique, il en est autrement. En général le meilleur moyen de calculer une composante réfléchie interne reste d'utiliser un logiciel de simulation. Cependant, il faut garder en mémoire que la finalité de cette modélisation est de pouvoir être intégrée à un automatisme de pilotage de stores vénitiens, et il paraît difficile d'effectuer de telles simulations en temps réel. Nous allons donc proposer un moyen de pondérer cette composante réfléchie interne moyenne donnée par l'équation 2.3 en fonction de la distance à la baie et de l'inclinaison des lames.

Nous avons donc vérifié les résultats fournis par notre modèle (composante directe déduite des équations de modélisation + composante réfléchie interne déduite de l'équation 2.3, de l'éclairement total) avec une nouvelle série de mesures effectuée dans les cellules-test, cette fois dans leur configuration normale (sans les parois noires).

Nous avons effectué cette validation pour des inclinaisons de lames inférieures à 90°, soit donc les positions 4, 5, 6, 7 et 8 (voir table 2.1). Pour chacune de ces cinq configurations nous avons mesuré la valeur de l'éclairement sur le mur à hauteur d'écran (1.2 m) tous les 50 cm. Nous comparons ces mesures aux résultats donnés par le modèle pour une valeur d'éclairement extérieure identique à celle des conditions de mesures (entre 4 et 5 klux). Pour chaque inclinaison de lames, nous traçons la variation de l'éclairement mesuré, la valeur de l'éclairement total calculé par le modèle, la valeur de l'éclairement direct seul, calculé également par le modèle, ainsi que la valeur de la composante réfléchie interne déduite de l'équation 2.3 (voir figure 2.8 pour une inclinaison des lames de 55°).



**Figure 2.8 :** Comparaison de l'éclairement mesuré avec ceux donnés par le modèle avec et sans composante réfléchie interne, pour une inclinaison de lames de 55°

Sur ces graphiques, on peut observer que la valeur de l'éclairement total calculé ne correspond pas à la valeur mesurée. La valeur totale calculée par le modèle est toujours supérieure aux mesures et il ne semble pas faux de dire que cette différence est majoritairement due à la composante réfléchie interne. En effet, la contribution des réflexions internes diminue à mesure que l'on s'éloigne de la baie. C'est pourquoi nous proposons d'adapter la valeur de l'éclairement total calculé en pondérant la contribution des réflexions internes. On ne calculera plus l'éclairement total comme étant la somme de l'éclairement direct déduit de la modélisation et de l'éclairement réfléchi interne donné par l'équation 2.3. Nous écrirons que, dans notre cas précis du

calcul de l'éclairement sur le mur perpendiculaire à la baie à une hauteur de 1.2 m, l'éclairement total calculé vaut:

$$E = E_D + a \times E_{RI}$$
 (éq. 2.4)

où a est un coefficient qui dépend de la distance à la baie et de l'inclinaison des lames. Sur la figure 2.8, on présente l'exemple des lames inclinées à 55°, si l'on analyse les variations pour les différentes inclinaisons étudiées, on peut distinguer deux tendances similaires: le cas des inclinaisons de lames supérieures ou égales à 50° et celles inférieures à 50°. Les différentes valeurs du coefficient a, déduites de la comparaison des mesures et des valeurs calculées par le modèle sont données dans la table 2.3.

| d (m)   | 0.5    | 1      | 1.5    | 2      | 2.5    | 3      | 3.5    | 4      | 4.5    |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| α ≥ 50° | 0.8692 | 0.6722 | 0.4667 | 0.3020 | 0.1480 | 0      | 0      | 0      | 0      |
| α < 50° | 0.5332 | 0.2942 | 0.2231 | 0.1699 | 0.1319 | 0.0966 | 0.0843 | 0.0777 | 0.0669 |

Table 2.3 : Valeurs du coefficient a.

Afin d'éviter d'avoir des valeurs négatives de *a*, ce qui n'aurait pas été scientifiquement correct, nous le fixons à zéro dans certains cas. On obtient ainsi une correction de l'éclairement total calculé par le modèle.

Une autre modification concernant la composante réfléchie interne sera appliquée au modèle. L'équation 2.3 n'est applicable qu'en absence de rayonnement solaire direct, or, il nous faut estimer la composante réfléchie interne même en présence de soleil direct sur la façade. C'est pourquoi, dès lors que le rayonnement solaire direct est bloqué par le store vénitien, la valeur de la composante réfléchie interne sera calculée avec l'éclairement vertical diffus et non l'éclairement vertical global.

# II.1.4.2. Cas du ciel clair avec rayonnement solaire direct.

# II.1.4.2.1.Inclinaison des lames pour bloquer le rayonnement solaire direct.

L'intérêt d'un store vénitien est de bloquer le rayonnement solaire direct lorsque celui-ci atteint la baie [Courret, 1993] [Al-Shareef, 2001] [Littlefair, 1993]. En effet, de nombreuses études sur le terrain ont montré que les individus commandent leur protection solaire de manière à prévenir leur environnement de travail du rayonnement solaire direct [Rea, 1984] [Inoue, 1988].

L'angle d'inclinaison des lames sera fonction de l'orientation de la baie, de la hauteur solaire, et de l'azimut, mais également de la géométrie du store vénitien (largeur des lames et espacement entre les lames).

Etant donné qu'il n'était pas possible de réaliser une modélisation empirique pour un panel suffisamment large de valeurs de hauteur solaire et d'azimut, nous proposons ici de caler l'inclinaison des lames en calculant les paramètres solaires en fonction

de l'orientation de la baie et des coordonnées du site, ainsi que de la date et l'heure, en appliquant l'équation de la position du soleil.

La hauteur solaire (angle par rapport à l'horizontale) et l'azimut (angle entre le Sud et le soleil) peuvent être calculés en connaissant la date et l'heure de la journée, ainsi que la latitude du site.

L'angle d'inclinaison de la Terre est donné par :

$$\delta = 23.45 \sin \left( \frac{360 \times (284 + N)}{365} \right) (éq. 2.5),$$

où N est le nième jour de l'année.

La hauteur solaire est définie par :  $sin(h) = sin \phi . sin \delta + cos \phi . cos \delta . cos AH$  (éq. 2.6), où  $\phi$  est la latitude du site et AH l'angle horaire. AH est nul à midi et varie de 15° par heure. L'angle horaire est donné par: AH = 15(Ts - 12) où Ts est le temps solaire vrai, exprimé en heure, au lieu considéré.

La valeur de l'azimut est donnée par: 
$$sin(Az_0) = \frac{cos \delta. sinAH}{cosh}$$
 (éq. 2.7)

L'azimut est, par définition, l'angle entre le Sud et la position du soleil. Il est négatif avant midi et positif après. L'azimut sera pris ici par rapport à la normale à la baie, une correction sera à appliquer pour les façades non-orientées plein sud. Dans la suite des calculs, on prendra comme origine pour l'azimut, non plus le Sud, mais la normale à la surface vitrée (l'origine des angles restant le sud). Ainsi, on définit un nouvel azimut (Az) comme étant l'angle entre la normale à la baie et le soleil (voir figure 2.9),  $Az = Az_0 - \varphi$  (éq. 2.8).

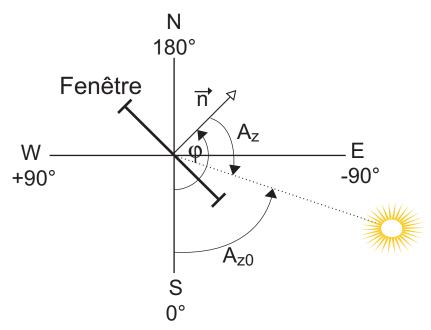


Figure 2.9: Repérage du nouvel azimut

On cherche ici la valeur de "l'angle critique d'ombrage" (inclinaison des lames minimum garantissant le blocage des rayons solaires directs) [Courret, 1993]. On distingue alors deux cas.

# a) Les lames restent à l'horizontale.

Les lames seront placées à l'horizontale lorsque la hauteur du soleil sera supérieure à une hauteur limite, déterminée par la géométrie du store.

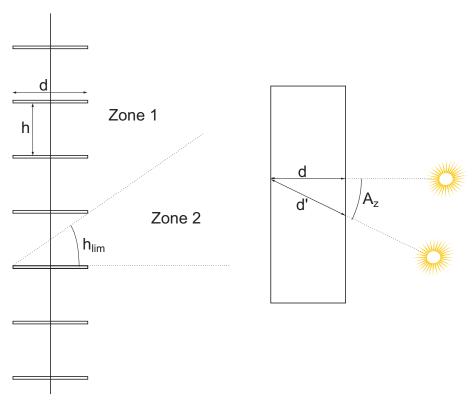


Figure 2.10: à gauche, vue en coupe du store vénitien à lames horizontales, à droite, vue de dessus

On appelle h<sub>lim</sub> la hauteur solaire limite en dessous de laquelle le rayonnement solaire direct pénètre à l'intérieur du local, lorsque les lames sont à l'horizontale, c'est la zone 2 sur la figure 2.10.

Lorsque Az = 0°, on a  $h_{lim_0} = \arctan\left(\frac{h}{d}\right)$  et quand Az  $\neq$  0°, la rayon solaire parcourt sur

la lame une distance  $d' = \frac{d}{\cos Az}$ . On peut donc généraliser en écrivant:

Lorsque la hauteur solaire est supérieure à  $n_{\text{lim}} = \arctan\left(\frac{h \times \cos Az}{d}\right)$  (éq. 2.9), zone 1

sur la figure 2.10, les lames du store vénitien pourront alors être placées à l'horizontale de manière à bloquer le rayonnement solaire direct.

# b) Les lames sont inclinées.

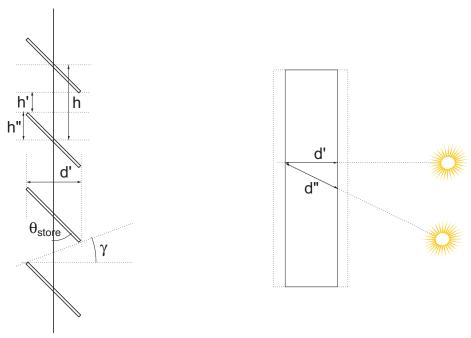


Figure 2.11: à gauche, vue en coupe du store vénitien à lames inclinées, à droite vue de dessus.

Lorsque la hauteur solaire est inférieure à  $h_{lim}$  le rayonnement direct pénètre à l'intérieur du local si les lames restent à l'horizontale. Elles devront donc être inclinées d'un angle critique d'ombrage  $\theta_{store}$  tel que  $\gamma < h_{soleil}$  (voir figure 2.11).

Lorsque Az = 0°, on a 
$$\tan \gamma = \frac{h'}{d'}$$
, avec  $h' = h - d\cos\theta_{store}$  et  $d' = d\sin\theta_{store}$ , ainsi  $\tan \gamma = \frac{h - d\cos\theta_{store}}{d\sin\theta_{store}}$  (éq. 2.10)

Si Az  $\neq$  0°, de le même manière que précédemment, l'azimut va intervenir. On aura cette fois  $\tan \gamma = \frac{h'}{d''}$  avec  $d'' = \frac{d \sin \theta_{store}}{\cos Az}$ , d'où  $\tan \gamma = \frac{(h - d \cos \theta_{store}) \times \cos Az}{d \sin \theta_{store}}$  (éq. 2.11).

# c) Généralisation

# II.1.4.2.2. Valeur de l'éclairement sur l'écran.

En ce qui concerne la valeur de l'éclairement sur le mur, nous procédons au même type de modélisation que pour l'absence de soleil direct. A l'intérieur des cellules-test

dont les parois sont toujours recouvertes d'un revêtement noir, nous avons effectué une série de photographies qui ont ensuite été analysées en luminance selon la même démarche que précédemment.

Les mesures ont été réalisées un 31 juillet à 10h30 heure locale, la facade est orientée à 110° Est, l'éclairement global sur la baie vaut autour de 50 klux. Sur la figure 2.12, on observe la répartition des luminances pour les différentes inclinaisons des lames conformément à la table 2.1.

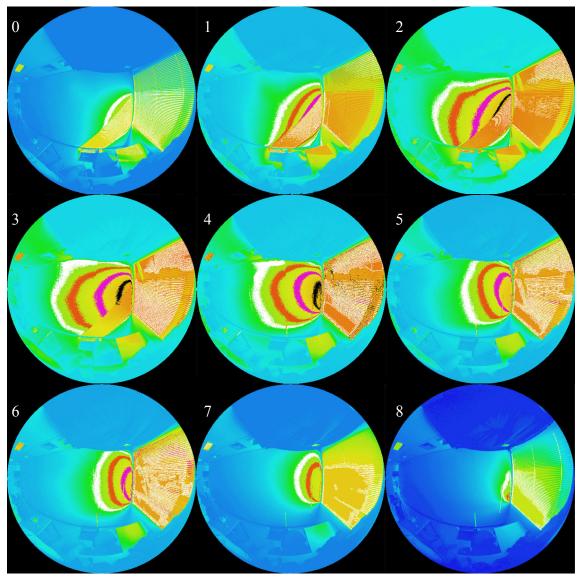


Figure 2.12: Indicatrice des luminances du store vénitien pour un ciel clair avec rayonnement solaire direct

Pour les angles supérieurs à 90°, le soleil direct pénètre dans le local. Cette inclinaison est d'ailleurs conforme à la valeur donnée par notre module de blocage du rayonnement solaire direct développé plus haut. Nous étudierons uniquement les cas où le rayonnement direct ne pénètre pas dans le local.

Pour ces cas où les lames sont inclinées à moins de 90°, on peut proposer une modélisation de la valeur de l'éclairement sur le mur en fonction de l'éclairement sur la baie, l'inclinaison des lames et la distance à la baie. Après le même type de

démarche que le cas du ciel couvert, on aboutit aux équations données dans la table 2.4.

| Distance à la baie (m) | Modélisation associée  | $R^2$  |
|------------------------|--|--------|
| 0.5                    | $E_{mur} = (0.00049 \times \alpha - 0.00476) \times E_{vertext}$   | 0.9899 |
| 1                      | $E_{mur} = (0.00031 \times \alpha - 0.00538) \times E_{vertext}$   | 0.9861 |
| 1.5                    | $E_{mur} = (0.000205 \times \alpha - 0.00385) \times E_{vertext}$  | 0.9879 |
| 2                      | $E_{mur} = (0.000134 \times \alpha - 0.002403) \times E_{vertext}$ | 0.9976 |
| 2.5                    | $E_{mur} = (0.000102 \times \alpha - 0.001673) \times E_{vertext}$ | 0.9985 |
| 3                      | $E_{mur} = (0.000082 \times \alpha - 0.001194) \times E_{vertext}$ | 0.9961 |
| 3.5                    | $E_{mur} = (0.00007 \times \alpha - 0.00089) \times E_{vertext}$   | 0.9901 |
| 4                      | $E_{mur} = (0.000066 \times \alpha - 0.000852) \times E_{vertext}$ | 0.9921 |
| 4.5                    | $E_{mur} = (0.00006 \times \alpha - 0.000722) \times E_{vertext}$  | 0.9893 |
| 5                      | $E_{mur} = (0.000058 \times \alpha - 0.000646) \times E_{vertext}$ | 0.9887 |
| 5.5                    | $E_{mur} = (0.000056 \times \alpha - 0.000616) \times E_{vertext}$ | 0.9899 |

**Table 2.4** : Modélisation des fonctions de transfert du store vénitiens en absence de rayonnement solaire direct sur la baie

Nous proposons donc une modélisation de la valeur de l'éclairement sur l'écran de visualisation lorsque celui-ci est disposé perpendiculairement à la baie. Celle-ci n'est applicable que pour les inclinaisons de lames inférieures à 90° et en présence de soleil direct sur la façade. Reste à savoir, à partir de la simple valeur de l'éclairement à quel moment il y a présence de soleil direct ou non. Nous fournirons un élément de réponse à ces questions dans le chapitre suivant.

Nous n'avons pas pu effectuer, comme pour le cas du ciel couvert, des mesures dans les cellules test dont les murs auraient été découvertes du revêtement noir afin de pouvoir pondérer la contribution de la composante réfléchie interne déduite de la formule des réflexions multiples (ég. 2.3). En effet, la façade est orientée à 110° Est par rapport au Sud, et nous avons effectué cette validation durant une période ou le soleil direct n'atteignait pas la façade même à des heures très matinales. Par conséquent nous utiliserons la pondération de la composante réfléchie interne donnée par la formule 2.4 et la table 2.3. A la différence près que nous ne calculerons pas cet éclairement dû aux réflexions internes avec la valeur de l'éclairement global sur la baie, mais à l'aide de l'éclairement diffus. En effet, une fois le rayonnement solaire direct bloqué, on peut penser que c'est davantage la composante diffuse de l'éclairement atteignant la baie qui va dicter la valeur de l'éclairement dû aux réflexions internes. En revanche, la raison pour laquelle nous utilisons l'éclairement global sur la baie pour calculer l'éclairement direct à l'intérieur, provient du fait que la modélisation a été réalisée en fonction de cette même valeur d'éclairement global sur la baie.

Le modèle détaillé ici n'est pour l'instant applicable que dans les cellules-tests. Afin qu'il soit applicable partout, nous le pondérons à l'aide de divers coefficients correctifs.

# II.1.5. Correction du modèle en fonction de la taille de la fenêtre.

La modélisation a été réalisée pour une taille de baie donnée (celle des cellules test). Pour appliquer ce modèle dans d'autres espaces, il faut adapter les résultats du modèle en fonction de la surface de la baie.

Le moyen le plus adapté de réaliser cette correction reste d'utiliser la notion de facteur de forme.

Par définition, la composante directe de l'éclairement en un point du local est égale à l'exitance lumineuse de la source multipliée par le facteur de forme entre la source et le point considéré.

Ainsi, nous corrigeons la valeur de l'éclairement direct sur le mur, fournie par le modèle, en la multipliant par  $\frac{FF_{fenêtre}}{FF_{fenêtreref}}$ .

#### II.1.6. Correction du modèle en fonction de la couleur des lames du store.

La modélisation est basée sur des mesures effectuées dans des cellules test équipées de stores à lames blanches. C'est pourquoi, il faut proposer une adaptation de cette modélisation lorsque les lames du store ne sont pas blanches.

En parallèle aux mesures dans les cellules d'essai, nous avons souhaité évaluer l'influence de la couleur et du type des lames. Pour cela nous disposons de quatre maquettes de stores vénitiens : blanc, noir, gris clair et gris foncé. Ces stores sont montés sur des cadres en bois noir de 60cm sur 60cm. Voir figure 2.13.



Figure 2.13: Maquettes des stores vénitiens.

Pour estimer le facteur de transmission hémisphérique-hémisphérique de ces stores vénitiens, nous avons placé ces maquettes sous le ciel artificiel de l'ENTPE, enveloppées dans un tissus noir. L'appareil photo a été placé derrière la maquette,

sous le tissu noir, à la façon des photographes du début du siècle, de manière à ne voir à travers l'objectif que l'ouverture faite par la maquette. Voir figure 2.14.

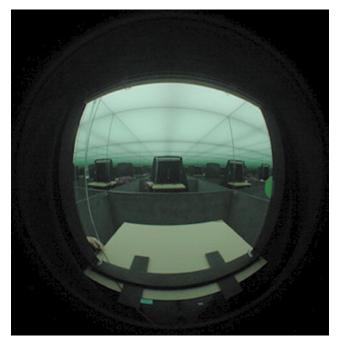
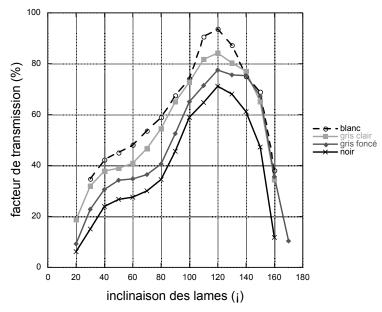


Figure 2.14: Point de prise des photos derrière la maquette, ici lames remontées.

Pour chaque type de store, nous avons pris une série de photos pour différentes inclinaisons des lames, ainsi qu'avec le store remonté (situation de référence, figure 2.14).

Après analyse de ces photos en luminance, nous pouvons déterminer un facteur de transmission hémisphérique-hémisphérique pour chacune des situations en faisant le rapport entre la situation considérée et la photo prise avec le store remonté. Les valeurs des coefficients de transmission obtenues sont présentées sur la figure 2.15.



**Figure 2.15**: Facteur de transmission hemisphérique-hemisphérique des stores en fonction de leur couleur.

Il est intéressant d'observer ici que le maximum de transmission ne se trouve pas lorsque les lames sont à l'horizontale, mais autour d'une inclinaison de 120°, lames vers le ciel. Ce phénomène avait également été observé lors des mesures dans les cellules test (voir figure 2.7).

L'intérêt de cette manipulation est de pouvoir intégrer le paramètre couleur des lames à la modélisation de la fonction de transfert précédemment exposée. On obtient aisément un coefficient de correction du modèle en multipliant la valeur de l'éclairement sur le mur (ou l'écran) par  $\frac{\tau_{couleur}(\alpha)}{\tau_{blanc}(\alpha)}$ . Les valeurs des coefficients de

correction ainsi obtenues sont présentées sur la table 2.5.

|            | 25°  | 35°  | 55°  | 70°  | 90°  | 105° | 125° | 135° | 145° |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| blanc      | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |
| gris clair | 0.80 | 0.92 | 0.86 | 0.87 | 0.97 | 0.94 | 0.91 | 0.97 | 0.99 |
| gris foncé | 0.50 | 0.70 | 0.74 | 0.68 | 0.78 | 0.83 | 0.85 | 0.93 | 0.99 |
| noir       | 0.33 | 0.51 | 0.58 | 0.56 | 0.68 | 0.75 | 0.77 | 0.80 | 0.75 |

Table 2.5 : valeur des coefficients de correction en fonction de la couleur des lames

Chacune des valeurs d'éclairement sur le mur, donnée par le modèle est donc multipliée par la valeur correspondant à l'inclinaison et la couleur spécifiées du coefficient de correction.

Pour la suite de la modélisation, les couleurs seront codées ainsi: 0=blanc, 1=gris clair, 2=gris foncé et 3=noir.

# II.1.7. Correction des valeurs en fonction de la hauteur des obstructions face à la baie.

La dernière correction que nous apporterons aux valeurs calculées par le modèle est celle due à la présence d'un masque face à la baie.

On rappelle l'intérêt de cet exercice qui est de fournir un modèle de commande de stores vénitiens. Si l'on imagine une façade équipée de stores vénitiens pilotés par notre loi de commande, une cellule de mesure de l'éclairement vertical extérieur sera alors placée au plus haut de cette façade. Si à présent un masque fait face à cette façade, il est aisé de comprendre que le rez-de-chaussée du bâtiment ne recevra pas la même quantité de lumière que le dernier étage. Nous allons donc proposer ici une corrélation entre l'éclairement en façade à une hauteur quelconque et l'éclairement mesuré par la cellule. Pour cela on définit les paramètres suivants, voir figure 2.16:

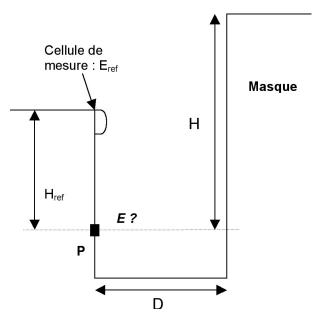


Figure 2.16: Paramètres du masque

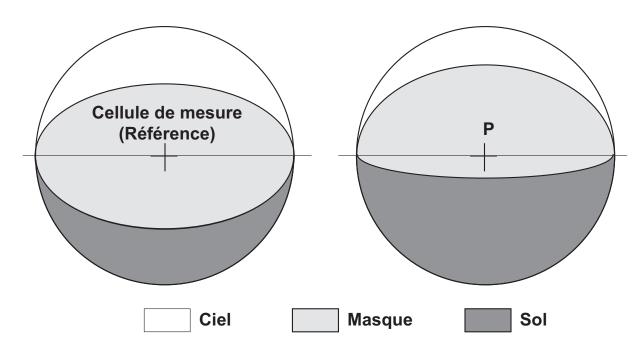
Sur la figure 2.16, le bâtiment de gauche, est masqué par le bâtiment de droite. On cherche ici à exprimer la valeur de l'éclairement au point P en fonction de  $E_{ref}$ , l'éclairement de référence mesuré par la cellule photométrique, en fonction de la hauteur par rapport à P de la cellule ( $H_{ref}$ ), de la distance du masque (D) et de la hauteur du masque au-dessus du point P (H). Les bâtiments sont supposés de longueur infinie. Pour cela nous allons appliquer la méthode d'Ondraceck, qui est une méthode géométrique

Dans notre cas, la méthode d'Ondraceck peut s'énoncer de la manière suivante :

Pour calculer en un point P l'éclairement dû à une surface de Lambert S de grandes dimensions et de luminance L, on commence par construire un hémisphère de rayon 1 sur la surface réceptrice. Puis on détermine la trace S' sur cet hémisphère des génératrices s'appuyant sur le contour extérieur de la surface S. On détermine enfin la surface S', projection de S' sur le plan de base de l'hémisphère.

L'éclairement au point P est alors déterminé par la formule:  $E_P = L \times S$ " [Fontoynont, 1998]

Concrètement, si l'on applique cette méthode au point de la cellule (situation de référence) et au point P, on obtient les constructions géométriques suivantes (figure 2.17):



**Figure 2.17**: Construction géométrique d'Ondraceck du point de référence (cellule) à gauche et du point P à droite.

Si l'on considère que les réflexions le demi-espace inférieur est de contribution négligeable sur la valeur de l'éclairement par rapport au demi-espace supérieur, on peut écrire:

$$E_{ref} = S_{cielref}'' \times L_{ciel} + S_{masqueref}' \times L_{masque}$$
 (éq. 2.13)  
 $E_P = S_{ciel}' \times L_{ciel} + S_{masque}'' \times L_{masque}$  (éq. 2.14)

On émet l'hypothèse simplificatrice que le masque et le ciel sont des surfaces de Lambert. Ainsi, par définition :  $E_{masque} = \frac{\pi}{2} L_{ciel}$  et  $\pi \times L_{masque} = \rho_{masque} \times E_{masque}$  d'où  $L_{masque} = \frac{\rho_{masque}}{2} \times L_{ciel}$  (éq. 2.15).

En combinant (éq. 2.13) et (éq. 2.14), on obtient:

$$E_{P} = \frac{S_{ciel}'' + \frac{\rho_{masque}}{2} S_{masque}''}{S_{cielref}'' + \frac{\rho_{masque}}{2} S_{masqueref}''} \times E_{ref} \text{ (éq. 2.16)}.$$

En considérant chacune des surfaces comme des portions d'ellipses,

$$S_{masque} = \arctan \left[ \frac{(H - H_{ref})}{D} \right]$$
 $S_{masque} = \arctan \left[ \frac{H}{D} \right]$ 

$$S_{ciel} = \frac{\pi}{2} - S_{masque}$$
  $S_{cielref} = \frac{\pi}{2} - S_{masqueref}$ 

et finalement.

$$E_{P} = \frac{\left(\frac{\pi}{2} + \left(\frac{\rho_{masque}}{2} - 1\right) \times \arctan\left(\frac{H}{D}\right)\right)}{\left(\frac{\pi}{2} + \left(\frac{\rho_{masque}}{2} - 1\right) \times \arctan\left(\frac{H - H_{ref}}{D}\right)\right)} \times E_{ref}$$
 (éq. 2.17)

Dans le but de minimiser les données d'entrée, on fixe le coefficient de réflexion du masque à 20 %, ce qui nous donne la relation:

$$E_{P} = \frac{\left(5\pi - 9\arctan\left(\frac{H}{D}\right)\right)}{\left(5\pi - 9\arctan\left(\frac{H - H_{ref}}{D}\right)\right)} \times E_{ref} \quad (éq. 2.18).$$

#### II.1.8. Validation du modèle.

### II.1.8.1. En ciel couvert.

Pour vérifier que cette correction s'applique bien dans d'autres cas, on effectue des mesures similaires à celles effectuées dans les cellules-test, mais cette fois dans un bureau qui sera utilisé par la suite dans le cadre de la campagne de mesures (le bureau D208).

Ce bureau est équipé de stores à lames noires. Nous effectuons de la même manière, les mesures de l'éclairement sur le mur à hauteur d'écran et la mesure de l'éclairement vertical extérieur (entre 7 et 8 klux ici).

Pour le calcul de l'éclairement sur le mur donné par le modèle, les lames étant noires, on utilise la correction donnée par les valeurs de la table 2.5 (le protocole détaillé dans le paragraphe II.1.6 de ce chapitre).

Nous trouvons des écarts relativement importants entre les mesures et les résultats donnés par le modèle dans lequel la contribution de la composante réfléchie interne a été modifiée selon les valeurs de la table 2.3. Sur la table 2.6 sont présentées les erreurs relatives à la mesure en fonction de la distance à la baie et de l'inclinaison des lames.

|         | 0.5 m | 1 m  | 1.5 m | 2 m  | 2.5 m | 3 m  | 3.5 m | moyenne |
|---------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|---------|
| 20°     | 1.33  | 0.41 | 0.42  | 0.88 | 0.86  | 0.83 | 1.75  | 0.93    |
| 30°     | 1.87  | 0.68 | 0.40  | 0.80 | 0.92  | 1.09 | 1.56  | 1.05    |
| 40°     | 0.82  | 0.29 | 0.08  | 0.21 | 0.39  | 0.48 | 0.73  | 0.43    |
| 50°     | 0.21  | 0.21 | 0.09  | 0.10 | 0.11  | 0.26 | 0.09  | 0.15    |
| 60°     | 0.18  | 0.21 | 0.27  | 0.06 | 0.17  | 0.20 | 0.02  | 0.16    |
| 70°     | 0.30  | 0.33 | 0.33  | 0.11 | 0.17  | 0.15 | 0.03  | 0.20    |
| 80°     | 0.39  | 0.39 | 0.34  | 0.10 | 0.12  | 0.07 | 0.15  | 0.22    |
| 90°     | 0.40  | 0.35 | 0.27  | 0.05 | 0.05  | 0.17 | 0.45  | 0.25    |
| moyenne | 0.69  | 0.36 | 0.27  | 0.29 | 0.35  | 0.41 | 0.60  | 0.42    |

**Table 2.6**: valeur de l'erreur relative à la mesure en fonction la distance à la baie et de l'inclinaison des lames pour un store vénitien noir.

L'erreur moyenne vaut 42 % ce qui est assez élevé. Les erreurs les plus fortes se produisent pour les faibles inclinaisons des lames, à proximité ou très loin de la baie. Ces erreurs peuvent être dues à la pondération donnée par les valeurs du coefficient a de la table 2.3 qui semblent surestimer la réalité, ou bien aux conditions lumineuses des expériences (niveau d'éclairement sur la baie trop faible) qui ont servi de base au modèle.

On peut supposer que les fortes erreurs lorsque les lames sont très inclinées sont dues aux réflexions multiples qui se produisent entre les lames. En effet, il est aisé d'imaginer que plus les lames sont inclinées, plus la lumière subira de réflexions entre celles-ci avant de pénétrer dans le local. Or la modélisation a été réalisée avec des stores à lames blanches, c'est pourquoi il est possible que les erreurs soient plus fortes pour les faibles inclinaisons en présence de lames noires.

# II.1.8.2. En présence de rayonnement solaire direct.

En présence de soleil direct, le modèle a besoin de la valeur de la composante diffuse de l'éclairement sur la baie. C'est pourquoi, étant donné que nous ne mesurions que l'éclairement global, il a fallu utiliser un modèle pour calculer cet éclairement diffus. Le modèle de Perez [Perez, 1990] que nous avons utilisé fourni la valeur d'un éclairement vertical diffus selon une orientation donnée à l'aide des valeurs des éclairements énergétiques horizontaux globaux et diffus ainsi que des éclairements horizontaux lumineux globaux et diffus. Nous disposions de ces valeurs par le biais de la centrale d'acquisition météo implantée sur le toit de l'ENTPE [Dumortier, 1995]. La seule correction que nous avons apportée aux valeurs d'éclairements verticaux diffus données par le modèle de Perez venait de l'architecture de notre site de mesure. En effet, les baies de cette façade étaient équipées de casquettes verticales et horizontales voir annexe 2, par conséquent les valeurs fournies par le modèle de ciel utilisé n'étaient pas applicable dans notre cas. Nous avons appliqué un coefficient correctif à ces valeurs du modèle, qui a été calculé à l'aide de la méthode d'Ondraceck (détaillée dans le paragraphe II.1.7), en considérant que le sol et les masques en béton ont un coefficient de réflexion qui vaut 15 %. Un calcul manuel abouti une valeur d'éclairement vertical diffus en présence des masques égale à la valeur de l'éclairement vertical diffus sans les masques (selon le modèle de Perez), multipliée par un coefficient correctif de 0.68. Nous avons effectué des mesures à l'intérieur du même bureau que pour le cas du ciel couvert. La comparaison des mesures avec le modèle, donne les résultats présentés sur la table 2.7.

|         | 0.5 m | 1 m  | 1.5 m | 2 m  | 2.5 m | 3 m  | 3.5 m | moyenne |
|---------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|---------|
| 20°     | 0.66  | 0.18 | 0.25  | 0.24 | 0.15  | 0.11 | 0.83  | 0.35    |
| 30°     | 2.04  | 1.10 | 1.06  | 0.98 | 1.08  | 1.50 | 2.50  | 1.47    |
| 40°     | 0.96  | 0.60 | 0.68  | 0.87 | 0.85  | 0.98 | 1.29  | 0.89    |
| 50°     | 0.35  | 0.46 | 0.04  | 0.02 | 0.26  | 0.20 | 0.37  | 0.24    |
| 60°     | 0.32  | 0.46 | 0.29  | 0.13 | 0.23  | 0.19 | 0.30  | 0.28    |
| 70°     | 0.50  | 0.21 | 0.04  | 0.04 | 0.02  | 0.05 | 0.03  | 0.13    |
| 80°     | 0.18  | 0.06 | 0.06  | 0.08 | 0.02  | 0.02 | 0.01  | 0.06    |
| 90°     | 0.28  | 0.13 | 0.12  | 0.06 | 0.15  | 0.20 | 0.30  | 0.18    |
| moyenne | 0.66  | 0.40 | 0.32  | 0.30 | 0.35  | 0.40 | 0.70  | 0.45    |

**Table 2.7**: valeur de l'erreur relative à la mesure en fonction la distance à la baie et de l'inclinaison des lames pour un store vénitien noir, en présence de rayonnement solaire direct.

Nous avons réalisé ces mesures un 24 février à 10h15, et si les lames sont inclinées à plus de 50°, le rayonnement solaire direct pénètre dans le local. Cela nous a d'ailleurs permis de vérifier que la valeur d'inclinaison des lames donnée par notre module de suppression de rayonnement solaire direct fourni de bons résultats. En effet, l'inclinaison des lames fournie par le modèle pour ces date et heure précises, vaut 55°.

Cependant, même si le modèle est construit de telle sorte à ne pas laisser pénétrer le rayonnement solaire direct, nous présentons les valeurs mesurées lorsque le soleil pénètre à l'intérieur du local. Nous avons pris soin de mesurer ces éclairements sur le mur qui n'était pas frappé par le rayonnement direct.

L'erreur moyenne totale vaut 45 %. On observe que, comme pour la validation en ciel couvert, les principales erreurs se produisent pour les faibles inclinaisons des lames, et lorsque l'on est proche ou très loin de la baie.

Malgré les erreurs constatées, nous conserverons la modélisation de la fonction de transfert du store vénitien en l'état, faute d'avoir pu effectuer une caractérisation optique plus précise. Il faut d'autre part garder en mémoire que la finalité de notre travail n'est pas de fournir un modèle de transmission lumineuse de stores vénitiens, mais bel et bien d'aboutir à un modèle permettant de piloter des stores vénitiens en donnant l'inclinaison des lames, en fonctions de divers paramètres, tout en permettant de remplir les critères de confort visuel énoncés plus haut, ainsi que de bloquer le rayonnement solaire direct.

# II.1.9. Utilisation des images pour l'application des critères de confort visuel.

On rappelle que ce que nous cherchons à faire ici consiste à proposer l'inclinaison des lames la plus adaptée à chaque configuration de bureau en tenant compte de la

position de l'écran dans la pièce ainsi que de sa géométrie et photométrie, et bien entendu de la valeur de l'éclairement vertical extérieur atteignant la baie.

En ce qui concerne la prise en compte des rapports de luminance (1:3:10) dans le champ de vision, on analysera la répartition des luminances de chacune des scènes prise à l'intérieur des cellules d'essai (les mêmes que celles qui ont servi à la détermination de la fonction de transfert du store vénitien). En effet, chacune de ces cartographies de luminances est accompagnée d'un fichier texte qui donne la valeur moyenne des luminances selon un maillage sur 212 mailles. Voir figure 2.18.

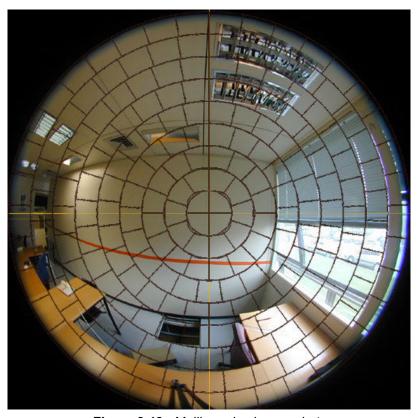


Figure 2.18 : Maillage de chaque photo

Tous les 50 cm, à une hauteur de 1.2 m (hauteur de l'écran) (voir la règle sur la figure 2.18), on relève la valeur de la luminance maximale à l'intérieur d'un cône de 60° d'angle au sommet dans un premier temps, puis dans un cône de 120° d'angle au sommet. Cette opération a été effectuée manuellement. Si l'on considère que l'on se trouve à 1m de l'écran, lorsque l'on travaille sur un écran de visualisation placé contre le mur perpendiculaire à la baie, il est aisé de savoir où se trouve le point le plus proche de la baie à l'intérieur des deux cônes de 60° et 120° d'angle d'ouverture. La zone de luminance maximale pour le cône à 60° d'ouverture se trouve à 60 cm sur le mur, en direction de la baie, et à 170 cm dans le cas du cône à 120° d'angle d'ouverture. Tous les 50 cm en partant de la baie on relève donc cette valeur maximale sur les fichiers-texte associés à chacune des photos prises pour une inclinaison des lames précise. On abouti ainsi à un tableau de valeurs indiquant, pour chacune des inclinaisons des lames étudiées (voir table 2.1) et pour chaque distance entre l'écran et la baie (tous les 50 cm), le rapport entre la luminance relevée et l'éclairement vertical extérieur correspondant aux conditions de mesures.

On peut ainsi pour chaque valeur d'éclairement vertical extérieur, dès lors que le rayonnement solaire direct est bloqué, déterminer la valeur de la luminance maximale dans les deux cônes de 60° et 120° d'angle d'ouverture.

Quelques cas seront cependant traités différemment. Il s'agit des cas où la luminance maximale se trouve sur la baie. C'est le cas du point situé à 50 cm de la baie pour la valeur maximale de luminance dans le cône de 60° d'ouverture, et des points situés à 50 cm, 1 m et 1.5 m pour la valeur maximale de luminance dans le cône de 120° d'ouverture. Pour ces cas précis, on déduira la valeur de la luminance, dès lors que le rayonnement solaire direct est bloqué, à l'aide de la relation :

$$L_{\text{max}} = \frac{\tau_{\text{v}} \times \tau_{\text{h-h}}(\alpha) \times E_{\text{vertext}}}{\pi} \text{ (éq. 2.19)}.$$

Connaissant ensuite la valeur de l'éclairement vertical extérieur, il est possible d'établir si les rapports de luminances 1:3:10 sont respectés pour les différentes configurations étudiés.

En ce qui concerne la valeur de la luminance de voile sur l'écran, on utilise la valeur de l'éclairement sur l'écran donné par les équations tenant compte de la fonction de transfert du store vénitien, et on considère que l'écran est une surface lambertienne. Tous ces calculs ne sont cependant valables que lorsque l'écran est situé perpendiculairement à la baie, nous allons à présent examiner les autres cas possibles.

# II.1.10. Autres positions d'écran.

Il faut à présent estimer la valeur de la quantité de lumière reçue par l'écran de visualisation lorsque celui-ci n'est pas placé perpendiculairement à la baie. Nous avons décidé de retenir 4 dispositions d'écran typiques (voir figure 2.19). Les positions 1 et 3 sont identiques en termes de transmission lumineuse à travers le store, lorsque le rayonnement solaire direct est bloqué.

En revanche les autres cas sont à traiter différemment.

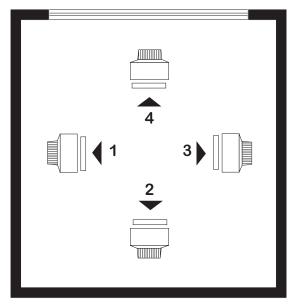


Figure 2.19 : Positions d'écran modélisées.

#### II.1.10.1. L'écran tourne le dos à la baie.

Dans le cas de la position 4, la principale cause de l'éblouissement subi sera due au contraste entre l'écran et la baie.

Ainsi, on considère que l'écran ne reçoit pas de rayonnement solaire direct, par conséquent la luminance de voile est uniquement due aux réflexions multiples. On applique donc la méthode décrite précédemment pour caractériser ces réflexions internes.

La luminance de voile sera en général assez faible, en revanche, le rapport entre l'écran et la baie sera très élevée si les lames du store vénitien ne sont pas suffisamment inclinées. Lorsque le rayonnement solaire direct est bloqué, on émet l'hypothèse que le rayonnement arrivant sur le store est diffusé, la fenêtre se comportant ainsi comme une surface de Lambert, et sa luminance vaut:

$$L_{\text{bale}} = \frac{\tau_{\text{v}} \times \tau_{\text{h-h}}(\alpha) \times E_{\text{vertext}}}{\pi} \text{ (éq. 2.20)}.$$

Et on vérifie quelles seront les positions des stores qui pourront permettrent de remplir le critère d'uniformité des luminances (1:3:10).

#### II.1.10.2. L'écran fait face à la baie.

Dans le cas de la position 2, la principale source de gêne sera produite par le reflet de la fenêtre sur l'écran. Autrement dit, on calera la position des stores de manière à maintenir la luminance de voile sur l'écran inférieure à la luminance maximale déduite des abaques de Blackwell.

La luminance de voile sur l'écran vaut :

$$L_{\text{voile}} = \rho_{\text{\'ecran}} \times L_{\text{baie}} = \frac{\rho_{\text{\'ecran}} \times \tau_{\text{v}} \times \tau_{\text{h-h}}(\alpha) \times E_{\text{vertext}}}{\pi} \text{ (\'eq. 2.21)}.$$

# II.1.11. Codage

Pour l'aspect programmation et codage nous avons utilisé le langage JAVA (version 1.1). C'est un langage-objet, dont le principe est similaire au C++, tout en étant plus simple d'utilisation. Il a l'avantage d'être multi-plateforme, ce qui le rend plus efficace, principalement pour une utilisation avec les divers navigateurs Internet (grâce au concept de machine virtuelle JAVA).

# II.2. Comparaison avec des observations faites à l'intérieur d'un bureau réel.

# II.2.1. Contexte et description du bureau utilisé.

A l'intérieur d'un bureau, nous avons essayé d'analyser quelles peuvent être les positions des lames les plus adaptées de manière à garantir des situations non éblouissantes. Ici, le modèle n'a pas été utilisé, nous nous sommes basés sur une série de photos prises pour divers types de ciel et inclinaison des lames. L'analyse de ces photos nous a permis d'aboutir à certaines hypothèses.

C'est un bureau traditionnel, assez sombre, essentiellement dédié à du travail sur écran d'ordinateur. L'écran, dont la luminance dans le noir vaut 65 cd/m², est situé perpendiculairement à la baie à une distance de 1 mètre. Voir figure 2.20.



Figure 2.20 : bureau utilisé pour l'étude de cas

Les critères de confort visuel utilisés ici, sont

- la luminance de voile de Blackwell,
- l'équilibre des luminances dans le champ de vision,

Pour sélectionner les positions du store les plus adaptées dans chaque situation lumineuse, nous vérifierons que les deux critères ci-dessus sont remplis.

### II.2.2. Méthode.

Nous avons photographié le poste de travail à l'intérieur de ce bureau dans différentes situations lumineuses et positions de stores. Ces photos ont été prises à l'aide d'un appareil photo numérique équipé d'un objectif fish-eye placé au niveau de l'œil de l'utilisateur, de la même manière que précédemment (voir figure 2.3).

Nous avons pris des photos du bureau dans des conditions ensoleillées d'une part, et de ciel couvert d'autre part, pour différentes inclinaisons des lames du store. Toutes ces photos ont été confrontées aux trois critères de confort visuel évoqués plus haut.

Chacune des scènes a été analysée afin de vérifier si la luminance résultante de l'écran dépasse la luminance maximale donnée par les abaques de Blackwell. Puis à l'aide du logiciel Photolux [Dumortier, 2001], nous obtenons une cartographie de la répartition des luminances pour chacune des scènes (voir figure 2.3). Nous pouvons déterminer ainsi si les rapports de luminances énoncés plus haut, sont respectés.

Après avoir mené tous ces calculs, nous avons fait l'hypothèse que les meilleures situations, ou inclinaisons des lames, pour le confort et la performance visuels sont celles qui remplissent les trois critères.

### II.2.3. Résultats et positions de stores recommandées.

Après l'analyse de toutes ces images, nous pouvons proposer trois catégories de positions de stores, en fonction des différents types de ciel.

- 1. Le soleil entre dans la pièce. Selon nos trois critères, afin de maintenir les conditions de confort visuel optimales, les stores doivent bloquer le rayonnement solaire direct. Les lames des stores vénitiens seront alors inclinées quasiment au maximum, entre 25 et 45°. Voir figure 2.21.
- 2. Pas de rayonnement solaire direct dans la pièce, mais l'éclairement vertical extérieur dans le plan de la fenêtre est supérieur à 8000 lux. Pour chacune des photos, l'éclairement extérieur dans le plan de la baie a été mesuré. Il semble que lorsque cet éclairement dépasse 8000 lux, les stores doivent être baissés pour remplir nos trois critères de confort visuel. Les lames doivent être inclinées entre 45 et 90° (position 2). Voir figure 2.21.
- 3. Pas de rayonnement direct dans la pièce, mais l'éclairement vertical extérieur dans le plan de la fenêtre est inférieur à 8000 lux. Nous avons observé que les stores n'ont pas besoins d'être fermés quand l'éclairement dans le plan de la fenêtre n'excède pas 8000 lux. Voir figure 2.21.

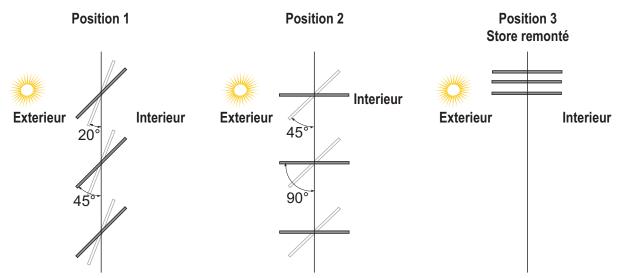


Figure 2.21 : Positions recommandées des lames

# II.2.4. Conclusions et perspectives

Cette étude de cas nous montre dans un premier temps que lorsque les lames sont inclinées vers le ciel, les conditions de confort visuel que nous avons choisi de tester ne sont pas vérifiées en théorie. Cette remarque fera l'objet d'une hypothèse que nous allons tester auprès des utilisateurs dans la suite de ce travail.

On peut conclure d'autre part qu'à première vue, si l'on compare les résultats fournis par le modèle pour une configuration identique au bureau testé, on observe des différences notoires. En effet, si l'étude de cas nous suggère que le store sera baissé à partir de 8 klux en façade, le modèle indique que le store sera baissé autour de 5 klux en façade, pou permettre de garantir les critères de confort évoqués plus haut. D'une manière générale, à ce niveau de l'étude, le modèle élaboré jusqu'ici semble sévère.

La campagne de mesures nous permettra par la suite de corriger les critères de confort visuels implémentés de manière à ce que ceux-ci soient cohérents avec le comportement lumineux des utilisateurs d'écran de visualisation.

# II.3. Application du modèle et exemples.

# II.3.1. Exemples

# II.3.1.1. Influence de la position de l'écran

On va chercher à montrer à travers un premier exemple, l'influence de la position de l'écran sur l'inclinaison des lames.

La configuration testée est la suivante, voir figure 2.22.

Eclairement vertical extérieur (lux) = 20000

Distance entre l'écran et la fenêtre (m) = 2

Luminance de l'écran dans le noir (cd/m2) = 70

Reflexion du sol = 0.3

Refléxion du mur = 0.4

Reflexion du plafond = 0.5

Couleur des lames (0:blanc 3:noir) = 2

Largeur pièce = 2.5

Profondeur pièce = 5

Hauteur pièce = 2.5

Largeur fenêtre = 2.5

Hauteur fenêtre = 1.2

Hauteur masque au dessus store = 0

Hauteur masque au dessus cellule = 0

Distance masque = 0

Position écran (1/2/3/4) = 1

Orientation de la baie = -45

Numéro du jour = 31

Heure = 9

Largeur des lames = 25

Espacement entre les lames = 20

Latitude = 45

Figure 2.22 : interface d'entrée du programme.

On va faire varier le paramètre "position écran" de 1 à 4 (voir figure 2.18). Dans la table 2.8, on donne les valeurs de l'inclinaison des lames la plus adaptée pour le critère de luminance de voile d'une part (inclinaison  $L_{voile}$ ), et celui d'uniformité des rapports de luminance d'autre part (inclinaison 1:3:10), la valeur finale étant, en théorie, le minimum des deux.

|                                | Ecran 1 | Ecran 2 | Ecran 3 | Ecran 4 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Inclinaison L <sub>voile</sub> | 70°     | 20°     | 70°     | 90°     |
| Inclinaison 1:3:10             | 90°     | 90°     | 90°     | 20°     |

Table 2.8: influence de la position de l'écran sur l'inclinaison des lames

On remarque que les positions d'écran 2 et 4 ne laissent pas beaucoup de possibilités en termes de gestion des stores. En effet, si l'on applique les critères de confort visuels les lames seront inclinées au maximum pour satisfaire, dans un cas, le critère de luminance de voile, et dans l'autre, celui d'uniformité des luminances dans le champ de vision.

En revanche si l'écran est placé perpendiculairement là baie comme il est recommandé dans la plupart des standards d'aménagement de bureau, l'atténuation de la baie est plus modérée.

### II.3.1.2. Influence de la distance entre l'écran et la fenêtre.

A présent, pour une configuration identique à celle de la figure 2.19, nous allons évaluer l'influence de la distance entre l'écran et la fenêtre, lorsque celui-ci est situé perpendiculairement à la baie (position 3). On fera varier cette distance entre 1 et 4 mètres, voir table 2.9.

|                    | d = 1m | d = 2m | d = 3m | d = 4m |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| Inclinaison Lvoile | 60°    | 70°    | 90°    | 90°    |
| Inclinaison 1:3:10 | 20°    | 90°    | 90°    | 90°    |

Table 2.9: Influence de la distance écran-fenêtre sur l'inclinaison des lames

Le résultat est sans surprise, plus on s'éloigne de la baie, plus on tolère des positions de stores laissant pénétrer davantage de lumière. On observe cependant que si l'on est proche de la baie, critère des rapports de luminance implique une occultation sévère. En effet, la baie peut vitre atteindre des luminances élevées, supérieures à 1500 cd/m2, malgré l'action du store vénitien et dès lors que la baie est dans le champ de vision de l'individu le rapport entre l'écran et la baie dépasse rapidement 10, aussi, l'occultation proposée par le modèle dans ce genre de cas est maximale. Nous verrons, lors de l'analyse des données de la campagne de mesures dans quelle proportions il est possible de modifier ce critère d'uniformité des luminances qui nous sert de seuil pour l'instant.

#### II.3.1.3. Influence de la luminance de l'écran.

Et enfin nous allons tester l'influence du paramètre "luminance d'écran dans le noir". En effet, comme l'a découvert Blackwell, la luminance de voile maximale acceptable sur l'écran, pour rester dans de bonnes conditions de performances visuelles, est fonction de la luminance initiale (voir table 2.10). Plus l'écran est lumineux à l'origine, plus on va pouvoir tolérer une luminance de voile élevée sans pour autant voir ses performances visuelles réduites.

| Luminance de l'écran dans le noir (cd/m²) | Luminance de voile maximale (cd/m²) |
|---|-------------------------------------|
| 60  | 10                                  |
| 70  | 15                                  |
| 80  | 20                                  |
| 90  | 27                                  |
| 100                                       | 32                                  |

**Table 2.10** : Valeur des luminances de voile maximales en fonction des luminances dans le noir de l'écran de visualisation

Les conditions sont identiques à la figure.2.21. L'écran est en position 3, à 2 mètres de la baie. Sur la table 2.11, on donne les valeurs des inclinaisons des lames nous garantissant les deux conditions de confort visuel qui nous servent de référence.

|                    | L=60 cd/m <sup>2</sup> | L=70 cd/m <sup>2</sup> | L=80 cd/m <sup>2</sup> | L=90 cd/m <sup>2</sup> | L=100 cd/m <sup>2</sup> |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| Inclinaison Lvoile | 60°                    | 70°                    | 80°                    | 90°                    | 90°                     |
| Inclinaison 1:3:10 | 90°                    | 90°                    | 90°                    | 90°                    | 90°                     |

Table 2.11: Influence de la luminance initiale de l'écran sur l'inclinaison des lames.

On voit ici que la qualité de l'écran de visualisation sur lequel travaille un individu, joue un rôle important sur l'inclinaison des lames garantissant de bonnes conditions de performances visuelles. En effet, d'après cet exemple, pour une même configuration, si la luminance initiale de l'écran passe de 60 à 90 cd/m², le store vénitien pourra offrir davantage de lumière naturelle sans altérer les performances visuelles d'un individu.

Le paramètre "luminance initiale de l'écran" semble être très sensible dans notre modèle. S'il s'avère qu'il l'est également dans la réalité, cela voudra dire que le pilotage des stores vénitiens pourra dépendre fortement des technologies d'écran. Ainsi la problématique du pilotage des stores dépendra d'un paramètre qui n'est pas souvent évoqué: la qualité de l'écran de visualisation.

C'est un des points que nous allons investiguer lors de la campagne de mesure sur site qui sera détaillée dans le chapitre suivant.

# II.4. Conclusions et perspectives.

Le modèle photométrique de transmission lumineuse des stores vénitiens est empirique. Nous aboutissons au final à des erreurs de 30 à 40 %, dues aux nombreuses hypothèses successives. Il eût été possible de réaliser une étude photométrique plus poussée, à l'aide notamment de simulations. Cet aspect représente un travail lourd que nous avons jugé hors contexte, ça n'était pas la finalité de notre travail. C'est un aspect qui est, bien entendu, perfectible. En effet, si une fonction de transfert précise de stores vénitiens est mise au point prochainement, elle pourra tout à fait être implémentée au modèle, en modifiant uniquement ce module précis. Mais ce degré de finesse est-il réellement nécessaire pour un automatisme de stores vénitiens?

D'autre part, il faut garder en mémoire que les critères implémentés au modèle sont le résultat de considérations physiques de confort visuel. Il n'est pas forcément rigoureux de prendre ces critères pour argent comptant. En effet, rien ne nous dit que les utilisateurs se placent dans des conditions de travail sur écran aussi strictes, de nombreuses études ont prouvé que ces critères ne sont pas très bien validés par les utilisateurs [Velds, 1999], [Osterhaus, 1998], [Iwata, 1991]. Il faut à présent étudier la façon dont les occupants de bureaux manipulent leurs stores pour évaluer la tolérance des usagers par rapport à l'éblouissement dû à la baie. Supportent-ils des niveaux de luminance de voile supérieurs à ceux donnés par Blackwell? Si oui, dans quelles proportions? Idem pour les rapports de luminances. Faut-il plutôt recommander des rapports de 1:5:20 ou 1:10:50?

La suite de cette recherche s'impose donc comme une évidence. Il faut obtenir une information de type comportemental sur la perception de l'éblouissement en éclairage naturel. En effet, selon Veitch et Newsham, on ne peut pas mesurer la

qualité lumineuse comme on mesure une longueur, une masse ou un éclairement. C'est pourquoi la qualité lumineuse ne peut être estimé qu'à partir de mesures comportementales [Dubois, 2001].

Le seul moyen de répondre à ces questions est d'aller enregistrer le comportement d'individus sur leur lieu de travail. Nous avons donc décidé de suivre le comportement d'utilisateurs face à leur protection solaire en situation réelle sur une période de plusieurs mois.

C'est cette campagne de mesures que nous allons à présent exposer.

# **Chapitre 3**

Suivi et analyse de l'utilisation de stores vénitiens.

# III.1. Etat de la question

### III.1.1. Introduction

Nous disposons à présent d'un modèle simplifié permettant de prédire la meilleure position théorique de stores vénitiens en fonction de différents paramètres d'aménagement du bureau, caractéristique de l'écran ainsi que de l'éclairement vertical extérieur. Ce modèle étant basé sur une approche théorique du confort visuel, il est nécessaire de vérifier, dans la mesure du possible, sa cohérence avec les choix lumineux des individus en situation réelle, afin de comprendre ce qu'il se passe dans la pratique.

Nous allons ainsi évaluer d'une part la cohérence des critères de Blackwell concernant les luminances de voile sur écran avec les situations réellement vécues, et d'autre part la tolérance d'un individu en situation de travail sur écran concernant les rapports de luminance dans le champ de vision.

Ces deux analyses auront pour but de permettre une adaptation in fine des critères de confort visuel implémentés dans le modèle précédemment exposé.

De nombreuses hypothèses seront également testées. Nous évaluerons, entre autres, l'effet de la température ambiante à l'intérieur de la pièce, de la présence d'éclairage artificiel ou encore de la motorisation, sur l'utilisation de la protection solaire.

Nous avons donc décidé de mettre en place une campagne de mesures in situ. Cette campagne a consisté à suivre au quotidien (toutes les quinze minutes) sur une longue période (trente semaines) le comportement d'un individu travaillant sur écran de visualisation dans un bureau individuel. Il s'agira d'enregistrer les différentes informations lumineuses ainsi que les positions du store vénitien choisies par l'occupant de manière à en tirer des corrélations et des observations.

Une enquête sous forme de questionnaire a été également soumise aux sujets. Les résultats nous ont essentiellement permis de déduire des hypothèses de travail, hypothèses que nous avons testées à l'aide des données collectées lors de la campagne de mesures.

En parallèle à cette campagne de mesure assez lourde, nous avons également mené une campagne visant à évaluer l'impact de la motorisation des protections solaires. A l'aide d'une webcam, nous nous intéresserons aux postions données par des utilisateurs à des protections solaires non motorisées afin de comprendre l'importance du système de commande sur la décision de l'utilisateur d'actionner ou non sa protection solaire.

Nous chercherons à répondre à plusieurs questions concernant l'utilisation des protections solaires : Quels sont les paramètres qui amènent un utilisateur à actionner sa protection solaire? Un utilisateur est-il cohérent avec lui-même dans son comportement lumineux?

### III.1.2. Etudes antérieures

Peu d'études ont été réalisées à ce jour concernant l'analyse du comportement d'un individu face à sa protection solaire. On en compte cependant quelques-unes dont les résultats et la démarche auront inspiré notre étude.

Le but de ces campagnes de mesure sur site est principalement de lier le comportement des utilisateurs à des paramètres physiques. En effet, le confort est un paramètre subjectif et sa quantification passe par l'analyse du comportement de sujets en situation réelle.

Foster [Foster, 2001] a observé que les individus occupés à des tâches de type travail de bureau, utilisent souvent leur protection solaire de manière inappropriée. En effet, il n'est pas rare d'observer des situations aberrantes, comme les stores totalement ouvert malgré la présence de soleil direct, ou encore des stores totalement fermés induisant une surconsommation d'éclairage artificiel. Il a été conclu par Rea [Rea, 1984] que, même si chaque individu du panel étudié a ses positions de store préférées quel que soit la saison et le climat, il est difficile, in fine, de prédire la position des protections solaires adaptée à un individu lambda (c'est à dire qui ne faisait pas partie des sujets étudiés). Cependant il semble davantage envisageable de dessiner des tendances ou des moyennes d'utilisation.

Reinhart [Reinhart, 2001] a mené une campagne de mesure comparable à la notre, à la différence près que les protections solaires dans le cadre de cette études étaient semi automatisées, c'est à dire qu'elles étaient pilotées par un automatisme suivant des consignes précises, avec toutefois une possibilité pour les sujets de prendre la main sur le système dès qu'ils le souhaitaient. Ses conclusions ont mis en évidence une certaine cohérence individuelle au niveau du pilotage des stores, même s'il semble que la configuration du bâtiment joue un rôle important sur cette cohérence. Il a également étudié en détail les probabilités d'allumage et d'extinction de l'éclairage artificiel, aspect que nous n'avons pas investigué aussi précisément. Son étude n'a pas permis de conclure sur la façon dont un individu agit sur un système purement manuel de pilotage des protections solaires.

Nous allons essayer d'apporter des éléments de réponse aux questions restées en suspend au terme de ces précédentes études à l'aide de mesures in-situ réalisées à l'intérieur de quinze bureaux.

# III.2. Descriptif des campagnes de mesure.

Pour obtenir des informations sur la façon dont un occupant de bureau utilise ses stores, la meilleure façon est d'enregistrer la position des stores qu'il choisit, à intervalles réguliers durant une longue période.

Nous avons par ailleurs décidé de mener deux campagnes de mesures en parallèle. La première a eu lieu à l'intérieur de huit bureaux individuels équipés de stores vénitiens (à lames noires) motorisés pilotés à l'aide d'une télécommande. La seconde a concerné sept bureaux, occupés par une ou deux personnes, équipés de screens de couleur jaune pilotés manuellement.

### III.2.1. Etude sur les commandes motorisées.

Nous avons retenu huit bureaux situés dans les locaux de l'ENTPE. A l'intérieur de ces bureaux (voir figure 3.1) les données suivantes ont été enregistrées toutes les 15 minutes, entre le 23 janvier 2002 et le 1<sup>er</sup> septembre 2002 :

- L'éclairement vertical extérieur. Deux cellules enregistrent la valeur de l'éclairement global vertical extérieur (voir descriptif en annexe 1).
- L'éclairement sur l'écran de visualisation de l'occupant.
- La position des stores vénitiens (inclinaison des lames et hauteur).
- L'état de l'éclairage artificiel (ON / OFF).
- La température ambiante.
- La présence de l'occupant.

Les éclairements verticaux extérieurs, l'éclairement sur l'écran, la position des stores vénitiens et la présence de l'occupant sont enregistrées toutes les quinze minutes sur un PC à l'aide d'un réseau LON-WORKS. Les autres paramètres sont enregistrés sur des data loggers autonomes. Le descriptif du matériel d'acquisition et du site est fourni en détail en annexe 1.

### III.2.1.1. Mesure de l'éclairement.

Toutes les mesures d'éclairement se font à l'aide de cellules LI-COR LI-210SA. Chacune de ces cellules fournit un signal en courant allant de 0 à 30 □A, ce signal est ensuite amplifié par un amplificateur réalisé à l'ENTPE, afin de fournir un signal en tension entre 0 et 10 volts. Au final tous ces signaux sont stockés sur un PC via le réseau LON WORKS.

### III.2.1.2. Mesure de la position des stores vénitiens.

L'intérêt d'un store vénitien est de permettre de rediriger la lumière en agissant sur l'inclinaison des lames. C'est pourquoi nous avons tout mis en oeuvre pour avoir cette information.

Tous les stores vénitiens sont pilotés à l'aide d'une télécommande individuelle par chaque utilisateur. Les stores fonctionnent à l'aide de moteurs à encodeur SOMFY (voir annexe 1). Chaque moteur envoie un signal contenant les informations concernant la hauteur du store (exprimée en pourcentage d'ouverture : 100=ouvert, 0=fermé) ainsi que l'inclinaison des lames (entre 20° et 165°).

Le signal est acheminé vers le PC via le réseau LON WORKS.

### III.2.1.3. Mesure de l'état de l'éclairage artificiel et de la température ambiante

Chacun des huit bureaux est équipé de deux data loggers autonomes HOBO RH/TEMP/LI. Le premier, placé directement sous le luminaire d'éclairage artificiel, nous indique si celui-ci est allumé ou éteint. Le second, placé sous le bureau de chaque utilisateur, nous indique la valeur de la température ambiante.

Ces mesures étant effectuées toutes les 15 minutes, les données doivent être déstockées manuellement suivant une période de 86 jours (capacité maximale de stockage).

### III.2.1.4. Mesure de la présence des occupants.

Le but de toute cette campagne de mesures reste de comprendre le comportement de l'utilisateur face à l'utilisation de ses stores. C'est pourquoi il est indispensable de savoir lorsque ce dernier est présent dans le bureau, afin de filtrer les données qui ne sont pas choisies par l'occupant.

La présence des occupants est relevée à l'aide d'un détecteur de mouvement (voir annexe 1).

Le signal est acheminé vers le PC via le réseau LON WORKS.

### III.2.2. Etude sur les commandes manuelles.

Nous avons choisi de comprendre également comment se comporte une personne à l'intérieur d'un bureau équipé de protections solaires non motorisées. Sept autres bureaux ont été sélectionnés dans une autre partie de nos locaux. Ces bureaux sont cette fois équipés de screens manuels de couleur jaune-orange.

Nous suivons l'évolution de la position de ces screens à l'aide de photos prises toutes les 15 minutes à l'aide d'une webcam située en face de la façade en question. Nous n'avons ici aucune information sur ce qu'il se passe à l'intérieur des bureaux, car pour des raisons techniques, il n'était pas possible de relier au réseau LON WORKS précédent, toute cette partie du bâtiment. Par conséquent, nous n'auront comme informations que celles relatives à la hauteur du store.

### III.2.3. Choix des sites.

### III.2.3.1. Site de la campagne de mesure.

Les mesures détaillées plus haut, sont effectuées à l'intérieur de sept bureaux situés dans les locaux de l'ENTPE (voir figure 3.1). Tous les bureaux, orientés Sud-Est, donnent sur une large cour. La vue est relativement dégagée et jugée plutôt plaisante par les personnes l'ayant pour principal paysage. (voir annexe 1).

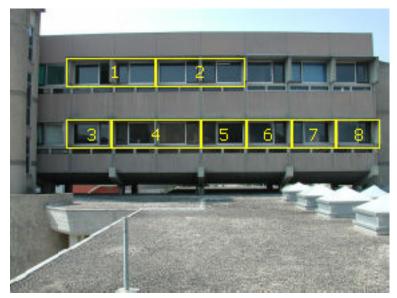


Figure 3.1: bâtiment où sont situés les huit bureaux de la campagne de mesure.

Voir le descriptif complet des bureaux dans l'annexe 1.

### III.2.3.2. Site de l'étude à l'aide d'une webcam.

Les bureaux concernés par cette partie de l'étude sont différents des précédents. Ils donnent également sur la cour intérieure de la figure 3.2, mais sont orientés plein Est.



Figure 3.2: Vue depuis les bureaux.

Chaque bureau est équipé de screens-toile de couleur jaune, contrôlés manuellement par les utilisateurs (1 ou 2 par bureau). Voir figure 3.3.



Figure 3.3: façade où sont situés les sept bureaux concernés par l'étude webcam.

# III.3. Questionnaire préliminaire soumis aux sujets.

Nous avons élaboré un questionnaire permettant de mieux comprendre le comportement de chacun de nos sujets face à la lumière naturelle.

Le questionnaire, basé sur ceux de Hygge [Hygge, 1997], a été soumis aux sujets avant l'installation des stores vénitiens motorisés. Le questionnaire est donné en annexe 2.

Nous voulions connaître les habitudes de nos sujets dans leur espace de travail. C'est pour cette raison que les réponses du sujet qui occupe le bureau D205 ont été exclues de la plupart des moyennes, étant donné qu'il est arrivé dans le bureau, pour une période de quatre mois, une fois les stores motorisés installés (en mars 2002). En revanche ses réponses sont inclues pour toutes les questions d'ordre général.

Les résultats présentés ici ont évidemment une importance relative à notre étude, il ne s'agit en aucun cas de les généraliser étant donné la petitesse de l'échantillon (huit sujets).

Pour ce qui est des considérations générales, nos huit sujets travaillent en moyenne 70 % du temps sur leur écran de visualisation, soit environ 5h30 par jour. Tous considèrent comme très important d'avoir une fenêtre dans leur bureau et jugent l'ambiance dans ce dernier comme lumineuse. Sept sujet sont satisfaits de la vue qu'ils ont vers l'extérieur, un seul trouve que la vue manque de verdure. Six d'entre eux estiment qu'ils actionnent leur protection solaire en premier lieu pour supprimer les reflets sur leur écran de visualisation. Et ils sont deux à considérer leurs conditions lumineuses de travail sur écran comme mauvaises.

Pour ce qui est des jugements spécifiques aux sept sujets ayant un vécu dans leur bureau avant l'installation des stores vénitiens motorisés, cinq d'entre utilisaient leur protection solaire manuelle à chaque fois qu'ils en ressentaient le besoin, et ne considéraient pas cette action comme ennuyeuse. Pour les deux autres, ils évoquent les difficultés d'accès au point de commande du store, et le fait que leur problème ne sera pas résolu par l'occultation de la baie (en ce qui concerne les reflets sur l'écran). Ils disent tous utiliser leur store entre une et deux fois par jour, et ils ne sont que trois à estimer que la motorisation de leur protection solaire pourrait améliorer leurs conditions de travail.

Ils évoquent tous la gêne qu'ils ressentent lorsque le rayonnement solaire direct pénètre dans leur bureau, et six d'entre eux estiment que la façon dont ils pilotent leur protection solaire est dépendante des saisons (donc de la température ambiante ?).

Quatre d'entre eux disent utiliser leur éclairage quand leur store, piloté manuellement, est baissé.

L'intérêt de ces questionnaires est essentiellement de nous fournir des informations sur les habitudes de nos sujets concernant l'utilisation de leur protection solaire. Ces informations vont nous permettrent d'élaborer un ensemble d'hypothèses pour pouvoir juger de l'apport de la motorisation des protections solaires ainsi que de nombreux autres phénomènes liés à la perception de la lumière.

# III.4. Hypothèses de travail.

Avant de nous lancer dans l'analyse des données collectées, il est important de limiter notre terrain d'action et de se fixer des points précis que nous souhaitons tester à l'aide des mesures.

Toutes les hypothèses, à l'exception de la quatrième, concernent la campagne de mesure sur site (avec les stores motorisés). Seule l'hypothèse 4 tiendra compte des données collectées à l'aide de la webcam sur une autre façade.

# III.4.1. Hypothèses concernant le confort visuel.

Un des objectifs de cette campagne de mesure consiste dans un premier temps à valider les critères de performance visuelle que nous avons retenus. Nous allons chercher à comprendre si les individus en situation réelle règlent leur protection solaire de manière à ce que les rapports de luminances soient dans un ratio 1:3:10 dans leur champ de vision et également si la luminance de voile sur l'écran n'excède pas celle donnée par les abaques de Blackwell.

Concernant cet aspect de luminance de voile, on trouve dans les critères de confort visuel du projet européen REVIS [Van Dijk, 2001] des recommandations concernant l'éclairement maximum conseillé sur l'écran. La valeur maximale de 500 lux est évoquée, ce qui correspond à une luminance de voile de 16 cd/m2 sur un écran à 10 % de réflexion. L'approche est assez similaire au concept de luminance de voile, même si ce seuil de 500 lux ne tient pas compte de la luminance initiale de l'écran.

Hypothèse 1: La luminance de voile sur l'écran de visualisation ne dépasse pas celle déduite des abaques de Blackwell.

Hypoyhèse 2: Les rapports de luminance dans le champ de vision d'un individu travaillant sur écran de visualisation sont dans un rapport 1:3:10.

Même si nous avons effectivement retenu (d'après la littérature essentiellement) que les indices de confort visuel n'étaient pas adaptés à la prédiction de l'inconfort visuel en situation de travail sur écran en éclairage naturel, il nous semble quand même

important d'utiliser nos mesures pour tester la cohérence de ces indices en situation réelle.

Nous avons choisi de vérifier si les résultats donnés pas le Glare Index (GI) de Cornell sont cohérents avec les choix des individus en situation réelle.

# Hypothèse 3: Le GI reste inférieur à 22.

Ces trois premières hypothèses vont nous permettre de caractériser le confort visuel des individus sur leur lieu de travail.

### III.4.2. Hypothèses concernant l'utilisation des stores.

Nous allons maintenant proposer des hypothèses à vérifier concernant le pilotage des protections solaires, plus précisément.

Ces hypothèses ont été, pour la plupart, élaborées à partir de considérations personnelles sur le sujet. D'autres sont également déduites des résultats de notre questionnaire ou encore de recherches antérieures.

Inoue [Inoue, 1988], lors d'une étude effectuée sur l'utilisation des protections solaires au Japon, a observé qu'une majorité des stores n'était pas actionnée. Une moyenne de 60 % des protections solaires (contrôlées manuellement) restait immobile quotidiennement.

Faber [Faber, 1992] rapporte qu'une fois qu'une protection solaire est baissée, il faut un changement radical des conditions lumineuses extérieures pour que l'individu la remonte. Dans le même sens, Foster [Foster, 2001] a observé que les individus placent souvent leur protection solaire à un certain degré d'occultation sans vraiment le modifier au cours de la semaine.

Reinhart [Reinhart, 2001], qui a mené une étude similaire à la nôtre, a enregistré durant 35 semaines 6393 mouvements des protections solaires. Il faut toutefois préciser que ces protections solaires étaient semi-automatisées, c'est-à-dire qu'elle étaient actionnées à partir d'un certain seuil d'éclairement sur la façade, avec toujours une possibilité par les occupants de prendre la main sur le système. Au total 3012 manipulations sont effectivement dues à l'automatisme, et elles furent suivies par 1413 corrections par les occupants. Donc finalement, seulement 1968 actions sur la protection solaire furent décidées par les sujets. Ce qui fait une moyenne de 5.6 actions (souhaitées par les occupants) par jour et par bureau.

Les huit sujets concernés par notre campagne de mesure ont en moyenne estimé qu'ils utilisaient leur protection solaire 1.5 fois par jour, lorsque celles-ci n'étaient pas motorisées. L'installation de stores vénitiens motorisés, pilotés à l'aide d'une télécommande par chacun des sujets, a-t-elle modifié leur fréquence d'utilisation de ceux-ci ? On peut a priori penser que oui.

Hypothèse 4 : Lorsqu'un individu dispose de protections solaires motorisées dans son bureau, il les utilise plus de deux fois par jour.

Dès les premiers jours de mesure sur le terrain, nous avons pu dresser des comportements vis-à-vis de l'utilisation des stores. En effet, il était surprenant de voir que, malgré la saison (les mesures ont démarré fin janvier 2002), certains sujets préféraient laisser leur protection solaire en position basse et ainsi agir uniquement sur l'inclinaison des lames.

Hypothèse 5: Les stores vénitiens sont soit totalement remontés, soit totalement baissés, et l'utilisateur n'agit que sur l'inclinaison des lames.

Tenter de déterminer le seuil de déclenchement des protections solaires est un exercice ambitieux. En effet, chaque individu se comporte différemment face à sa protection solaire, et on peut penser qu'il sera difficile de trouver un seuil de déclenchement du store qui sera commun à tous les sujets.

Inoue [Inoue, 1988] a mis en évidence le phénomène d'hystérésis concernant l'utilisation des protections solaires. Il a en effet observé qu'un individu en situation de travail occulte sa baie à un niveau de rayonnement extérieur plus élevé que celui auquel il la découvre. Cette étude a été réalisée selon des considérations énergétiques, c'est à dire que le rayonnement concerné n'est pas le rayonnement visible uniquement. Inoue a déterminé que, sur une façade sud-ouest, les protections solaires sont baissées à un niveau, sur le plan de la fenêtre, pouvant aller jusqu'à 400 kcal/m²h en hiver et jusqu'à 300 kcal/m²h en été (nous reviendrons sur ce décalage de seuil entre hiver et été un peu plus loin quand nous envisagerons l'influence de la température ambiante sur l'utilisation du store). En revanche le seuil auquel l'individu va actionner sa protection solaire de manière à avoir plus de lumière, est inférieur.

Reinhart [Reinhart, 2001] a mis en évidence le même phénomène. A partir d'observations et de suivi de comportement comme nous l'avons fait, il a conclu que le seuil à partir duquel les protections solaires sont baissées se situe autour de 50 klux sur la baie, et celui à partir duquel elles sont remontées autour de 28 klux, en moyenne. Ces seuils ne sont valables que pour le passage du store de la position haute à la position basse et inversement, ils ne tiennent pas compte des mouvements des lames, étant donné que ce paramètre n'était pas enregistré durant cette étude.

Ces valeurs sont bien supérieures à celles estimées dans le chapitre précédent selon des considérations physiques de confort visuel [Sutter, 2001]. Il a en effet été observé au cours de cette étude qu'afin de garantir de bonnes conditions de performances et de confort visuel, la baie doit être occultée à partir de 8 klux.

Une approche qui nous paraît également intéressante, est non plus de considérer la quantité d'éclairement sur la baie, mais de s'intéresser à la lumière qui entre effectivement à l'intérieur du bureau, telle qu'elle est perçue par le sujet depuis l'intérieur. Etant donné que nous avons déterminé le facteur de transmission d'un store vénitien en fonction de l'inclinaison des lames, il est tout à fait envisageable de pouvoir calculer la luminance de la baie, dans la mesure où le rayonnement direct est bloqué. Ainsi, nous pourrons estimer si les individus manipulent leur protection solaire de manière à limiter cette luminance à un certain niveau. Les travaux de Velds [Velds, 1999] ont amené à la conclusion que lorsque la luminance de la baie

dépasse 1800 cd/m<sup>2</sup> un individu ferme sa protection solaire 30 à 60 minutes après que la luminance a atteint ce seuil.

Hypothèse 6.1 : Les stores sont manipulés lorsque l'éclairement extérieur atteint 8 klux.

Hypothèse 6.2 : Les sujets règlent leur protection solaire de manière à ce que la luminance de la baie n'excède pas 1800 cd/m<sup>2</sup>.

Hypothèse 6.3 : Le seuil d'éclairement extérieur auquel les baies sont occultées est plus élevé que celui auquel elles sont découvertes.

Courret [Courret, 1993] a observé que les utilisateurs qui règlent leur protection solaire efficacement sont finalement peu nombreux. Il rapporte que les stores sont souvent baissés et que les lames sont en position de rejet du soleil vers l'extérieur, même si le soleil est absent, aboutissant ainsi à une sur-utilisation de l'éclairage artificiel

Foster [Foster, 2001] cite l'argument souvent avancé concernant l'influence de la lumière naturelle sur l'utilisation de l'éclairage artificiel: "l'augmentation de la lumière naturelle disponible tend à réduire la consommation d'éclairage artificiel".

Dès les premiers jours après l'installation des nouveaux stores vénitiens à lames noires, la majorité des sujets se sont plaints de la tristesse qu'apportaient ses stores à l'ambiance de leur espace de travail. Une remarque d'un des sujets nous a d'ailleurs invité à reconsidérer l'argument rapporté par Foster.

"L'autre jour il faisait grand soleil, donc j'ai fermé mes stores pour ne pas être ébloui(e) si bien qu'après il faisait tellement sombre dans le bureau que j'ai été obligé(e) d'allumer la lumière."

Hypothèse 7: Des stores vénitiens à lames trop sombres entraînent une sur-consommation de l'éclairage artificiel.

L'influence de la température ambiante sur la perception de la lumière est un phénomène qui est souvent étudié dans le cadre de la caractérisation des ambiances.

Laurentin [Laurentin, 2001] a montré que si la température ambiante n'a apparemment pas de réel effet sur la perception de la lumière, la saison semble, en revanche, jouer un rôle plus important. En effet, il semblerait qu'en hiver les individus préfèrent des niveaux d'éclairement intérieurs plus élevés qu'en été.

Même s'il admet que les individus travaillant dans un bureau lorsqu'il fait chaud seront davantage amenés à utiliser leur protection solaire, Nicol [Nicol, 2001] n'a pas trouvé de corrélation significative entre la température intérieure à un bureau et l'utilisation des protections solaires.

La norme NF EN ISO 7730 [ISO, 1995] nous informe qu'en conditions estivales, la température opératoire ne doit pas dépasser 26° C pour garantir de bonnes conditions de confort à l'occupant de bureau.

Hypothèse 8 : Si la température ambiante à l'intérieur du bureau dépasse 26°C, le seuil de déclenchement du store est réduit.

En moyenne, il est prouvé que le niveau d'éblouissement perçu est plus élevé lorsque la baie se reflète sur l'écran de visualisation [Osterhaus, 2001]. Dès lors que l'écran subit des réflexions parasites, les performances visuelles sont diminuées. Lorsque la baie se reflète directement sur l'écran, on peut assumer, en première approximation, que si l'écran a un coefficient de réflexion de 10 %, la luminance de voile ajoutée à celui-ci sera de l'ordre de un dixième de la valeur de la luminance de baie. Par conséquent, une luminance de baie de l'ordre de 500 cd/m2, va apporter une réflexion spéculaire de l'ordre de 50 cd/m2 à laquelle viendra s'ajouter la luminance de voile due à l'éclairage ambiant. Il ne paraît donc pas aberrant de supposer que dans une telle configuration (reflet de la baie présent en permanence sur l'écran) la luminance de la baie (perçue depuis l'intérieur du bureau) aura des effets notoires sur l'utilisation de la protection solaire.

Hypothèse 9 : La présence du reflet de la fenêtre sur l'écran de visualisation entraîne une occultation plus forte de la baie.

### III.5. Note sur les traitements des données.

#### III.5.1. Problèmes rencontrés.

1 336 560 données ont été collectées ici. Les études longitudinales (échantillon de petite taille ou non suivi sur une longue période), comme celles que nous avons menées, présentent des avantages et des inconvénients.

Les avantages sont facilement compréhensibles. Lorsqu'il s'agit d'essayer de comprendre la façon dont un individu agit sur un paramètre (dans notre cas, la position des stores), suivre son comportement sur une longue période permet d'éviter les phénomènes de modifications comportementales dues à des tests en laboratoire. C'est pourquoi nous avons choisi de mener une campagne de mesure sur le terrain plutôt que soumettre les individus à des tests en laboratoire. Nous avons volontairement choisi d'aller vers les utilisateurs plutôt que de les faire venir à nous. Etant donné la longue période de mesures (trente semaines) nous pouvons ainsi affirmer que le comportement des individus n'a pas été modifié par l'expérience. Les inconvénients que présentent ce type d'études résident essentiellement dans des difficultés de traitement des données. En effet, dans le cas d'études en laboratoire, il est facile de contrôler les paramètres susceptibles de modifier le comportement des sujets. Dans notre cas, de nombreux paramètres viennent perturber les mesures. Qu'il s'agisse de l'état psychologique du sujet (fatigue, quantité de travail, stress dû au bruit, etc...), ou bien de paramètres plus difficiles à évaluer comme le temps de travail du sujet sur son écran de visualisation. En effet, nous avons basé la plupart de nos hypothèses sur le travail sur écran, et nous avons mesuré l'éclairement sur l'écran de visualisation. Or les données de présence que nous avons récoltées attestent effectivement de la présence du sujet dans son bureau, mais pas du tout du temps passé sur écran. Pour des raisons de confidentialité, il ne nous a pas été autorisé à accéder à l'ordinateur de chacun des sujets afin d'y installer un programme enregistrant la mise en veille de l'écran.

Nos sujets passent en moyenne 70 % de leur temps de travail sur leur écran, on peut donc estimer qu'il y a un bruit relativement important qui perturbe nos données. Nous n'avons pas trouvé de moyen d'y remédier.

#### III.5.2. Traitement des données.

C'est pour toutes ces raisons, et aussi après avoir commencé à tracer les variations des données que nous avons préféré ne pas nous lancer dans un traitement statistique poussé de nos données. En effet, après avoir pris conseil auprès de spécialistes du traitement statistique, il est apparu difficile d'obtenir des corrélations significatives sur des données aussi dispersées que celles que nous avons collectées.

C'est pourquoi nous avons essentiellement fonctionné à partir d'observations. Nous avons utilisé des méthodes d'analyse en fréquence, ainsi que des méthodes simples de calcul de moyennes et d'écart type pour représenter graphiquement la variation des données.

Le seul traitement statistique à proprement parler que nous ayons utilisé est la méthode du Logit [Bonnet, 1986]. C'est une méthode qui est particulièrement adaptée dans le cas de traitement de données dichotomiques (tout ou rien) comme la position d'un store (monté ou baissé). Elle est souvent utilisée dans le cas d'études comportementales de notre type [Nicol, 2001].

Afin d'appliquer cette méthode, on émet l'hypothèse que nos données suivent une loi normale. C'est en effet le cas de toute variable indépendante dont les valeurs résultent de la contribution d'une multitude de facteurs indépendants [Rihaoui, 2001]. Cette hypothèse de loi normale nous permet d'écrire, en utilisant la fonction Logit (fonction logistique), qu'une probabilité  $P_i$  répondant à un stimulus Si s'exprime de manière linéaire par :

$$Logit(P_i) = In \left( \frac{P_i}{1 - P_i} \right) = a \times S_i + b \text{ (eq. 3.1)}$$

Où dans notre cas précis,  $P_i$  sera la proportion de stores ouverts correspondant au stimulus  $S_i$ , c'est à dire le niveau d'éclairement sur la façade. En outre, ici, il est plus significatif d'utiliser la valeur du logarithme de l'éclairement plutot que la valeur de l'éclairement elle-même. Ainsi, notre fonction Logit s'exprime :

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = a \times \log(E) + b \text{ (eq. 3.2)}$$

Pratiquement, nous disposons de N couples de données (P, E) où P est l'état du store (0=fermé, 1=ouvert) et E la valeur associée d'éclairement sur la façade. Il s'agit de répartir ces N données sur un nombre précis d'intervalles contenant exactement le même nombre de données. Pour chaque intervalle, on obtient une valeur P

correspondant à la proportion de stores ouverts (par exemple) associée à la valeur moyenne de l'éclairement sur l'intervalle. Et si l'on trace la variation de ln(P/(1-P)) en fonction de Log(E), on obtient comme prévu une variation linéaire. La méthode des moindres carrés nous permet de déterminer les coefficients a et b de l'équation du Logit.

Connaissant les valeurs des constantes a et b, une courbe peut être tracée exprimant la proportion de stores ouverts (P) en fonction du logarithme de l'éclairement sur la façade (Log(E)), elle est donnée par la relation :

$$P = \frac{e^{(a \times \log(E) + b)}}{1 + e^{(a \times \log(E) + b)}} \text{ (eq.3.3)}$$

### III.6. Résultats.

Les 1 336 560 données collectées durant les 30 semaines de la campagne de mesures ont été filtrées dans un premier temps de manière à ne conserver que celles effectivement choisies par les occupants, lorsqu'ils sont effectivement présents à l'intérieur de leur bureau.

# III.6.1. Hypothèse 1 (luminances de voile).

#### III.6.1.1. Luminance de voile.

Comme il est décrit dans le chapitre 1, d'après Blackwell la luminance de voile maximale, en dessous de laquelle le travail visuel est efficace, est fonction de la luminance dans le noir de l'écran. Le tableau 3.1 ci-après rappelle les caractéristiques de chacun des écrans au démarrage de la campagne, ainsi que les modifications apportées aux régales des écrans au cours de la campagne, de même que les valeurs des luminances de voile correspondant aux différents niveaux de visibilité (VL) selon Blackwell:

| Bureau    | Luminance dans       | L <sub>voile</sub>   |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|           | le noir de l'écran   | (VL8)                | (VL7)                | (VL6)                | (VL5)                | (VL4)                |
|           | (cd/m <sup>2</sup> ) |
| D203      | 43                   | 7                    | 20                   | 29                   | 48                   | 77                   |
| D204      | 85                   | 30                   | 44                   | 70                   | 99                   | 165                  |
| D205      | 15                   | Χ                    | 1                    | 6                    | 12                   | 20                   |
| D206      | 40                   | 5                    | 16                   | 25                   | 42                   | 67                   |
| D207      | 50                   | 8                    | 20                   | 32                   | 53                   | 87                   |
| D207      | 105                  | 45                   | 63                   | 85                   | 130                  | 212                  |
| (modifié) |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
| D208      | 19                   | X                    | 3                    | 9                    | 16                   | 26                   |
| D208      | 37                   | 4                    | 13                   | 21                   | 37                   | 58                   |
| (modifié) |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
| D302      | 15                   | Χ                    | 1                    | 6                    | 12                   | 20                   |
| D302      | 75                   | 20                   | 34                   | 48                   | 82                   | 142                  |
| (modifié) |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
| D303      | 81                   | 26                   | 40                   | 58                   | 93                   | 154                  |

Table 3.1: Caractéristiques des écrans

Comme on peut le constater, les performances de chaque écran varient de manière non négligeable. On peut même constater que pour les bureaux D205, D208 et D302, les conditions initiales ne permettent pas, dès le départ, des performances visuelles satisfaisantes.

Ainsi, afin d'évaluer l'influence de la luminance dans le noir de l'écran sur les choix lumineux des sujets, nous avons modifié les luminances de trois écrans: celles des bureaux D207, D208 et D302. Les modifications ont été effectuées début Juillet 2002.

Les valeurs des luminances de voile sont déduites des mesures d'éclairement en considérant les écrans comme des surfaces lambertiennes. Un écran ayant un coefficient de réflexion de l'ordre de 10 %, sauf pour le bureau D302 avant modification, dont l'écran est équipé d'un dispositif anti-reflet, dont le coefficient de réflexion vaut 5 %. Pour donner un ordre de grandeur, on indique qu'une luminance de voile de 20 cd/m² sur un écran à 10 % de réflexion correspond à un éclairement de 628 lux.

Nous avons dans un premier temps effectué une analyse en fréquences des valeurs de luminances de voile pour chacun des bureaux. Nous avons regroupé les écrans en trois familles, en fonction de leur qualité:

- Mauvaise qualité: L<sub>écran</sub> < 35 cd/m<sup>2</sup>. Bureaux D205, D208 (avant modification) et D302 (avant modification).
- Qualité standard: 35 cd/m<sup>2</sup> < L<sub>écran</sub> < 60 cd/m<sup>2</sup>. Bureaux D203, D206 et D207 (avant modification).
- Bonne qualité: L<sub>écran</sub> > 60 cd/m<sup>2</sup>. Bureaux D204, D207 (après modification), D302 (après modification) et D303.

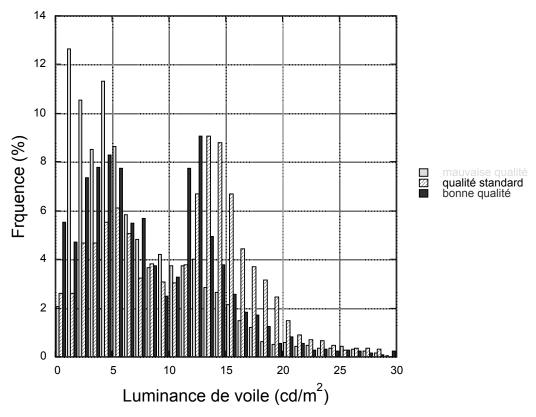


Figure 3.4: Répartition en fréquence des luminances de voile selon la qualité de l'écran.

Sur la figure 3.4, on observe tout d'abord que les sujets se placent dans des conditions lumineuses permettant une luminance de voile inférieure à 20 cd/m² dans la majorité des cas. On peut noter que pour les écrans de luminance initiale supérieure à 80 cd/m², la luminance de voile maximale acceptable selon les théories de Blackwell, dépasse 20 cd/m² (voir table 3.1). Cependant, dans la pratique, on ne note que très peu de cas où la luminance de voile dépasse 20 cd/m². Nous aurions peut-être pu assister à de telles luminances de voile si nous avions pu disposer d'écrans haute technologie dont la luminance peut atteindre 200 à 250 cd/m² [Macworld, 2001].

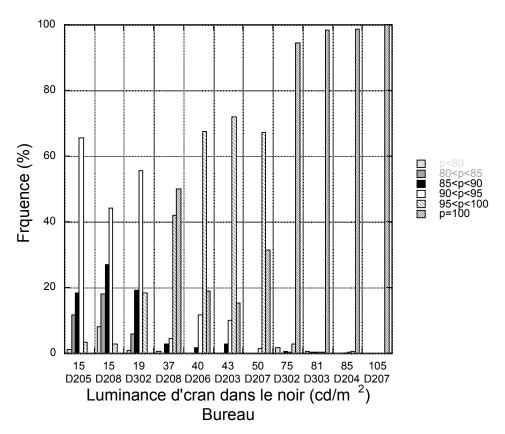
La répartition en fréquence des luminances de voile pour les écrans de mauvaise qualité nous confirme que plus la luminance de fond de l'écran est faible, plus on cherchera à maintenir la luminance de voile en dessous d'une valeur raisonnable. On observe ici que 70 % des luminances de voile sont maintenues inférieures à 10 cd/m² par les sujets concernés.

L'analyse de la répartition en fréquence des luminances de voile pour les deux autres familles d'écrans, ne donne pas tout à fait les résultats attendus. En effet, si l'on observe un second pic autour de 15 cd/m² sur la figure 3.4, il semble que les sujets équipés d'écrans de qualité standard tolèrent des luminances de voile plus élevées que ceux équipés d'écrans de bonne qualité. Cette observation contredit quelque peu les hypothèses de Blackwell.

On peut également effectuer le même type d'analyse en fréquence sur les niveaux de performance visuelle atteints.

### III.6.1.2. Performance visuelle.

Comme il est résumé dans la table 1.1 (chapitre 1), à chaque niveau de visibilité correspond un niveau de performance théorique établi par Blackwell (voir paragraphe 2.2.1.). On peut donc, connaissant les luminances de voile correspondant aux différents niveaux de visibilité, déterminer les fréquences de performances visuelles (relatives à VL8), sous lesquelles les sujets travaillent, induites par leur choix lumineux. On peut tracer, en fonction de la luminance de fond de l'écran les fréquences d'occurrence des différents niveaux de performance.



**Figure 3.5:** : Fréquences d'occurrence des différents niveaux de performance visuelle en fonction de la luminance de l'écran dans le noir.

S'il était difficile de tirer des conclusions de la figure 3.4, la connaissance des résultats de la figure 3.5 nous aide à mieux évaluer l'influence qu'a la luminance de voile sur les performances visuelles sous lesquelles travaille chacun des sujets. Plusieurs cas peuvent être distingués ici.

En ce qui concerne les écrans de mauvaise qualité, des conditions lumineuses non adaptées peuvent conduire à des baisses de performances visuelles considérables.

Les sujets des bureaux D205, D208 (avant modification) et D302 (avant modification) peuvent être ainsi amenés à travailler dans des conditions de performance visuelle inférieures à 90 % pendant une durée allant de 25 à 55 % du temps. La modification de la luminance de fond de l'écran pour les bureaux D208 et D302 entraîne par ailleurs une amélioration non négligeable des conditions de performances visuelles. Elle devient, pendant plus de 90 % du temps, supérieure à 95 % pour le bureau D208 et égale à 100 % pour le bureau D302.

Pour les écrans de qualité standard, les performances visuelles sous lesquelles travaillent les sujets sont correctes. En effet, la performance est ici supérieure à 95 % la majorité du temps.

Enfin, pour les écrans de bonne qualité, les performances sont optimales.

### III.6.1.3. Conclusions sur l'hypothèse 1.

Si l'on couple les résultats concernant les luminances de voile et ceux concernant les performances visuelles, on s'aperçoit que la luminance de fond de l'écran joue tout de même un rôle important. En effet, plus celle-ci est faible, plus les performances visuelles de l'individu sont diminuées.

En revanche, si les recommandations de Blackwell paraissent quelque peu restrictives pour les écrans de mauvaise qualité, on peut, d'après l'analyse des données, proposer une limite à la luminance de voile à 5 cd/m² dans ce cas. En effet, même si les individus confrontés à de telles situations tolèrent également des luminances supérieures à 5 cd/m², leurs performances visuelles peuvent être réduites, dans ce cas, de façon non négligeable.

On a observé dans la pratique que les sujets équipés d'écran de qualité standard tolèrent des luminances de voile allant jusqu'à 20 cd/m². Cependant les performances visuelles associées ne sont pas optimales. Il ne paraît donc pas aberrant de suggérer qu'il est préférable que les luminances de voile des écrans standards restent inférieures à 10 cd/m² pour garantir aux individus des conditions de performances visuelles optimales.

Et enfin, pour les écrans de bonne qualité, on constate les sujets concernés semblent régler leur protection solaire de manière à limiter la luminance de voile sur leur écran plus fortement que les sujets équipés d'écrans standard. Les luminances de voile n'excèdent que rarement 20 cd/m². D'autre part, les performances visuelles sous lesquelles travaillent ces sujets sont optimales. Par conséquent, on pourra conseiller dans ce cas, de maintenir la luminance de voile sur l'écran en dessous de 20 cd/m².

On peut noter au passage que ces valeurs de luminances de voiles rencontrées sur le terrain sont très inférieures aux valeurs maximales des sources susceptibles de se refléter sur l'écran, données par la norme ISO 9241 (voir chapitre 1, paragraphe 2.2.1). Même si la situation n'est pas identique, on s'intéresse ici à la luminance de voile diffuse sur l'écran (due à l'éclairement sur l'écran) et non au reflet spéculaire

des sources parasites, la valeur maximale suggérée par cette norme valait 100 cd/m<sup>2</sup>.

On peut d'autre part, à titre d'exemple, s'intéresser à la luminance de la baie correspondant aux trois luminances de voile seuil citées plus haut. A l'aide du modèle photométrique élaboré dans le chapitre 2, pour un écran situé à 1 mètre de la baie perpendiculairement, dans un bureau standard (comme les bureaux simples de notre étude), on aboutit aux valeur décrites dans la table 3.2.

| Qualité de | Luminance de voile maximale | Luminance de baie      |
|------------|-----------------------------|------------------------|
| l'écran    | acceptable (cd/m²)          | correspondante (cd/m²) |
| Mauvaise   | 5                           | 1200                   |
| Standard   | 10                          | 1400                   |
| Bonne      | 20                          | 2000                   |

**Table 3.2:** Correspondance entre la qualité de l'écran, la luminance de voile maximale acceptable et la luminance de la baie.

Nous reviendrons plus loin (dans le cadre de l'hypothèse 6) sur les luminances de baie maximales acceptables par les sujets. Mais il est intéressant de voir ici le lien qui existe entre la qualité de l'écran et la tolérance à la luminance de la baie.

Nous n'avons malheureusement pas pu tester les luminances de voiles maximales acceptables par les sujets pour les écrans nouvelle technologie ayant des luminances pouvant aller jusqu'à 200-250 cd/m² [Macworld, 2001]. On peut penser que la tolérance à la luminance de baie serait encore un peu plus élevée, jusqu'à une certaine limite cependant. Après analyse des données collectée, et au regard des luminances tolérées pour des écrans à luminance inférieure à 100 cd/m², les valeurs seuils de 3000-3500 cd/m² ne paraissent pas aberrantes pour les écrans nouvelle technologie.

### III.6.2. Hypothèse 2 (rapports de luminance dans le champ de vision).

### III.6.2.1. Résultats.

Nous n'avons malheureusement pas pu installer un dispositif expérimental permettant de mesurer en continu les luminances dans le champ de vision des sujets. Par conséquent, afin de pouvoir évaluer les rapports de luminances dans le champ de vision, nous avons fonctionné à partir de l'analyse de photos de scènes prises au quotidien, durant une semaine environ. Régulièrement, des photos ont été prises du point de vue du sujet en situation de travail sur écran, en conservant les réglages effectués sur le store et l'éclairage artificiel par le sujet à ce moment précis. Ces images ont été analysées avec le logiciel Photolux [Dumortier, 2001] de manière à obtenir des cartographies de luminances. L'analyse de ces images nous a fourni des informations sur la répartition des luminances dans le champ de vision des sujets suivant le réglage de leur protection solaire. La question reste de savoir si les luminances sont effectivement dans un rapport 1:3:10, ou s'il en est autrement.

L'analyse d'une quarantaine de scènes nous montre que l'on peut assister à des répartitions assez extrêmes. On relève au maximum des rapports de luminance entre l'écran et le champ de vision (cône de 120° d'ouverture) allant de 1 à 275.

Parmi les rapports élevés, on observe que les sujets peuvent tolérer des luminances dans le champ de vision périphérique de l'ordre de 50 fois celle de leur écran. Cependant la surface couverte par ces valeurs de luminance élevées reste réduite, de l'ordre de 5 % de la zone du champ de vision.

Si l'on moyenne les rapports obtenus, on obtient des ratios de l'ordre de 1:10:30. Cependant, nous sommes conscients que le nombre de situations envisagées (une quarantaine) est réduit. Par conséquent, si l'on écarte de cette moyenne les valeurs extrêmes, comme le cas du rapport 1:275, on aboutit à des rapports de luminance de l'ordre de 1:6:20.

Comme on pouvait l'imaginer, il est difficile de rester dans les rapports 1:3:10 envisagés dans l'hypothèse de départ. Cette recommandation est essentiellement valable pour les situations d'éclairage artificiel. Nous avons en effet observé que pour les bureaux dans lesquels le sujet ne voit pas la fenêtre dans son champ de vision lorsqu'il travaille sur son écran, les rapports de luminances restent plus souvent dans les proportions 1:3:10. Dès qu'une partie de la baie est visible dans le champ de l'individu, il semble qu'il existe une tolérance plus élevée aux fortes luminances, du moment qu'elles ne couvrent qu'une partie raisonnable du champ de vision (de l'ordre de 5 %).

# III.6.2.2. Conclusions sur l'hypothèse 2.

L'analyse de situations de travail réelles nous a montré que si les rapports de luminances dans le champ de vision de l'ordre de 1:3:10 sont vérifiés en situations où les sources d'éclairage naturel sont absente du panorama de l'individu, ils ne le sont pas dès lors qu'une telle source est visible par l'individu lorsqu'il travaille sur son écran de visualisation. En effet, dans un cas de ce type, même si une tolérance peut aller jusqu'à 1:50 sur un petite surface du champ de vision (5 % environ), les rapports de luminance tolérés sont plus dans un ratio 1:6:20 que 1:3:10.

### III.6.3. Hypothèse 3 (indices de confort visuel).

### III.6.3.1. Résultats.

Pour chacune des scènes de l'hypothèse 2, nous avons calculé la valeur du Glare Index (GI) de Cornell, selon l'équation 1.6 donnée dans le chapitre 1. A chaque fois qu'une scène a été photographiée, nous nous sommes assuré, en lui posant la question, que le sujet était dans des conditions visuellement confortables.

Le calcul du DGI, qui était plus approprié dans notre cas, posait des problèmes de codage, en effet, si l'on considère la formule du DGI (éq. 1.7) il n'est pas aisé de déterminer la luminance du ciel à travers la baie et la luminance de la baie. D'autre part, nous avons estimé que le fait de considérer la fenêtre comme source

potentiellement éblouissante, comme c'est le cas pour le calcul du DGI, n'était pas forcément représentatif d'une situation éblouissante. En effet, les reflets ou les taches solaires sur les parois sont également des sources potentiellement éblouissantes. C'est pourquoi, en plus d'être plus simple à calculer, nous avons décidé de retenir le GI plutôt que le DGI, car il tient compte de toutes les sources potentiellement éblouissantes.

Mais il reste tout de même un problème de taille pour calculer le GI (ou tout autre indice de ce type), en effet, les définitions de la source éblouissante sont assez obscures. Il n'est donc pas simple de savoir ce que l'on considère comme source éblouissante. Nous avons choisi d'adopter deux approches, la première consiste à dire que l'on considère toutes les sources ayant une luminance supérieure à 500 cd/m² comme potentiellement éblouissantes (GI<sub>500</sub>) [AFNOR, 1990], et la seconde consiste à évaluer la limite statistique (déduite de la répartition en fréquences) entre les luminances les plus faibles et les luminances les plus élevées d'une scène (GI<sub>stat</sub>).

L'analyse de toutes les scènes, donne des valeurs du GI étonnamment élevées. On trouve en moyenne sur une quarantaine de scènes, une valeur de 42, si l'on considère les sources éblouissantes à partir de 500 cd/m², et 46 avec la méthode statistique de calcul de la luminance limite.

Les seules scènes qui fournissent des valeurs raisonnables de GI sont celles où les sources d'éclairage naturel sont absentes de l'image, et si l'on fait le calcul en considérant les sources de luminance supérieure à 500 cd/m² comme éblouissantes.



Figure 3.6: Exemples de scènes associées à leurs valeurs de GI.

Sur la figure 3.6, on peut observer que les valeurs de l'indice GI sont très élevées dès lors qu'une source de lumière naturelle apparaît dans le champ de vision. La limite de l'éblouissement juste inconfortable vaut 22, les GI ne restent inférieurs à ce seuil, sur la figure 3.6, que pour les situations où l'éclairage naturel est absent du champ de vision, et lorsqu'ils sont calculés en prenant 500 cd/m² comme luminance de source éblouissante.

# III.6.3.2. Conclusions sur l'hypothèse 3.

On peut donc conclure ici que cet indice d'estimation du confort visuel, n'est d'une part, pas très aisé à calculer (définition de la luminance des sources éblouissantes assez floue), et d'autre part, les valeurs obtenues dès lors qu'une source d'éclairage naturel est présente dans le champ de vision sont extrêmes élevées.

Le Glare Index ne semble pas, d'après nos expériences, refléter les conditions de confort visuel vécues par les individus en lumière naturelle. Les valeurs fournies par le Gl surestiment l'éblouissement réellement vécu.

### III.6.4. Hypothèse 4 (fréquence d'utilisation des protections solaires).

### III.6.4.1. Résultats.

Nous cherchons ici à montrer que la motorisation de la protection solaire amène les usagers à utiliser celle-ci de manière plus fréquente.

Pour cela nous utiliserons les résultats fournis par l'étude effectuée à l'aide de la webcam (voir III.2.2). Cette étude a consisté à photographier une façade orientée Est, toutes les 15 minutes, en parallèle à la campagne de mesure. Des problèmes d'acquisition d'image, ont cependant conduit à une perte conséquente des photographies de la façade. Nous n'avons pu photographier l'évolution de l'utilisation des protections solaires par les usagers que durant 69 jours. Un total de 228 actions sur les protections solaires a été identifié sur 58 jours. Ce qui donne 4.7 actions par jour où il y a au moins un mouvement de la protection solaire, pour toute la façade. Sachant qu'il y a sept bureaux sur cette façade, nous arrivons à une moyenne de 0.7 action par jour où il y a au moins un mouvement de la protection solaire, par bureau. Si l'on procède à la même analyse pour les bureaux étudiés dans le cadre de notre campagne de mesure, toujours en effectuant les moyennes uniquement sur les jours où il y a au moins une action sur la protection solaire.

Un total de 850 actions a été relevé sur la façade équipée de stores vénitiens motorisés. Il faut noter que trois des huit bureaux sont des bureaux doubles (D204, D302 et D303) dans lesquels il y a quatre fenêtres donc quatre stores (voir annexe 10 pour la description des bureaux). Les actions sur les stores deux stores les plus éloignés du poste de travail dans ces trois bureaux sont rares. En effet, nous avons enregistré cinq actions pour les bureaux D204 et D303 et huit actions pour le bureau D303. Ces dix-huit actions ne seront pas prises en compte dans la suite de l'analyse étant donné qu'elles ne traduisent pas une décision visant à améliorer les conditions de travail sur l'écran, car ces stores en sont éloignés.

Le traitement individuel des résultats est résumé sur la table 3.3.

|         | nb d'actions |             |                     | nb de jours où il |                      |
|---------|--------------|-------------|---------------------|-------------------|----------------------|
|         | depuis le    | nb de jours | moyenne (nb         | y a au moins une  | moyenne quand il y a |
| bureau  | 28/01/02     | occupés     | d'actions par jour) | action            | au moins une action  |
| D203    | 125          | 89          | 1.4                 | 56                | 2.2                  |
| D204    | 50           | 98          | 0.5                 | 29                | 1.7                  |
| D205    | 50           | 61          | 0.8                 | 24                | 2.1                  |
| D206    | 203          | 108         | 1.9                 | 76                | 2.7                  |
| D207    | 126          | 75          | 1.7                 | 46                | 2.7                  |
| D208    | 151          | 103         | 1.5                 | 57                | 2.6                  |
| D302    | 95           | 110         | 0.9                 | 51                | 1.9                  |
| D303    | 32           | 93          | 0.3                 | 26                | 1.2                  |
| moyenne | 104.0        | 92.1        | 1.1                 | 45.6              | 2.1                  |

Table 3.3: Nombre d'actions de la protection solaire

On voit donc que lorsque les stores sont motorisés, les individus manipulent leur protection solaire 2.1 fois par jour où il y a au moins une action. En revanche si la protection solaire est manuelle, cette moyenne tombe à 0.7.

### III.6.4.2. Conclusion sur l'hypothèse 4.

Ces données nous montrent donc que lorsqu'une protection solaire est motorisée, un individu, lorsqu'il décide de l'actionner, sera amené à l'utiliser trois fois plus que si elle ne l'était pas. Ainsi, la motorisation semble indispensable car lorsqu'elle est présentes, les individus utilisent et règlent leurs stores trois fois plus souvent.

# III.6.5. Hypothèse 5 (modes d'utilisation du store).

Intéressons nous à présent au mode de pilotage des protections solaires choisi par nos sujets. Nous cherchons à comprendre ici la façon dont la dynamique lumineuse offerte par le store vénitien est exploitée par chaque individu. Nous avons émis l'hypothèse qu'un store vénitien est utilisé en mode "tout ou rien", c'est à dire que les stores seront placés soit en position haute, soit en position totalement basse, et l'utilisateur n'agit que sur l'inclinaison des lames, les positions intermédiaires n'étant que très peu envisagées par les usagers de stores vénitiens. Voyons de quelle manière cette hypothèse est vérifiée par les préférences des sujets. Intéressons-nous tout d'abord aux comportements individuels.

### III.6.5.1. Utilisation individuelle.

La table 3.4 résume mensuellement, bureau par bureau, les fréquences d'utilisation des stores vénitiens dans les catégories suivantes:.

- Position haute
- Position intermédiaire
- Position basse, lames à l'horizontale (=90°).
- Position basse, lames inclinées vers le ciel (>90°).
- Position basse, lames inclinées vers le sol, occultation moyenne, entre 45° et 90°.
- Position basse, lames inclinées vers le sol, occultation forte (<45°).

| D203          | fevrier | mars | avril | mai  | juin | juillet | aout | moyenne |
|---------------|---------|------|-------|------|------|---------|------|---------|
|               |         |      |       |      |      | -       |      | ·       |
| haut          | 0       | 0    | 0     | 0    | 0    | 0       | 0    | 0       |
| inter<br>=90° | 0       | 0.2  | 4.7   | 0    | 0    | 0       | 0    | 0.7     |
|               | 42.5    | 3.7  | 4.7   | 0    |      |         | 0    | 7.3     |
| >90°          | 1.3     | 18.4 | 9.4   | 0    | 35.1 | 29.7    | 16.7 | 15.8    |
| 45°-90°       | 39.5    | 60.2 | 52.8  | 100  | 39.6 | 51.7    | 70.6 | 59.2    |
| <45°          | 16.7    | 17.5 | 28.3  | 0    | 25.3 | 18.6    | 12.8 | 17.0    |
| D204          | fevrier | mars | avril | mai  | juin | juillet | aout | moyenne |
| haut          | 2.0     | 2.2  | 6.7   | 5.4  | 12.9 | 0       |      | 4.9     |
| inter         | 0       | 0.1  | 0     | 0    | 0    | 0       |      | 0       |
| =90°          | 93.4    | 81.4 | 85.4  | 85.1 | 75.5 | 97.9    |      | 86.5    |
| >90°          | 1.0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0       |      | 0.2     |
| 45°-90°       | 3.1     | 16.1 | 7.9   | 2.3  | 6.5  | 2.1     |      | 6.3     |
| <45°          | 0.6     | 0.1  | 0     | 7.1  | 5.1  | 0       |      | 2.1     |
| D205          | fevrier | mars | avril | mai  | juin | juillet | aout | moyenne |
| haut          |         | 2.1  | 0     | 0    | 15.0 |         |      | 4.3     |
| inter         |         | 53.1 | 0.9   | 0    | 0.4  |         |      | 13.6    |
| =90°          |         | 7.9  | 0     | 29.8 | 28.4 |         |      | 16.5    |
| >90°          |         | 3.7  | 38.7  | 11.3 | 0.2  |         |      | 13.5    |
| 45°-90°       |         | 6.8  | 58.5  | 58.9 | 37.9 |         |      | 40.5    |
| <45°          |         | 26.3 | 1.9   | 0    | 18.1 |         |      | 11.6    |
| D206          | fevrier | mars | avril | mai  | juin | juillet | aout | moyenne |
| haut          | 0       | 0    | 0     | 0    | 0    | 0       |      | 0       |
| inter         | 0       | 0    | 0     | 0    | 0    | 0       |      | 0       |
| =90°          | 72.4    | 45.8 | 15.4  | 37.0 | 31.0 | 34.1    |      | 39.3    |
| >90°          | 14.7    | 2.1  | 0.3   | 3.3  | 20.1 | 0       |      | 6.7     |
| 45°-90°       | 11.9    | 36.1 | 75.9  | 34.4 | 40.5 | 61.9    |      | 43.4    |
| <45°          | 0.9     | 16.1 | 8.4   | 25.4 | 8.4  | 4.0     |      | 10.5    |
| D207          | fevrier | mars | avril | mai  | juin | juillet | aout | moyenne |
| haut          | 27.0    | 28.0 | 25.9  |      | 7.7  | 27.1    | 45.1 | 26.8    |
| inter         | 25.1    | 6.5  | 8.0   |      | 0    | 6.3     | 0    | 7.7     |
| =90°          | 8.0     | 3.2  | 0     |      | 0    | 4.4     | 0    | 2.6     |
| >90°          | 0       | 0    | 2.5   |      | 0    | 0       | 0    | 0.4     |
| 45°-90°       | 17.2    | 31.7 | 19.1  |      | 30.7 | 22.7    | 20.1 | 23.6    |
| <45°          | 22.7    | 30.6 | 44.4  |      | 61.6 | 39.5    | 34.8 | 38.9    |
| D208          | fevrier | mars | avril | mai  | juin | juillet | aout | moyenne |
| haut          |         | 67.0 | 30.5  | 32.8 | 31.7 | 44.9    | 47.4 | 42.4    |
| inter         |         | 17.4 | 38.3  | 33.8 | 31.0 | 34.6    | 26.3 | 30.3    |
| =90°          |         | 8.8  | 0     | 16.6 | 8.1  | 1.2     | 0    | 5.8     |
| >90°          |         | 1.3  | 0     | 0    | 0    | 0       | 0    | 0.2     |
| 45°-90°       |         | 2.3  | 14.7  | 8.7  | 1.3  | 10      | 2.6  | 6.6     |
| <45°          |         | 3.2  | 16.5  | 8.1  | 28.0 | 9.3     | 23.7 | 14.8    |
|               |         | U.Z  | 10.0  | U. I |      | 0.0     | 20.1 | 17.0    |

|         |         | ı    |       |      |      | ı       |      | T                |
|---------|---------|------|-------|------|------|---------|------|------------------|
| D302    | fevrier | mars | avril | mai  | juin | juillet | aout | moyenne          |
| haut    | 85.7    | 77.2 | 51.0  | 65.4 | 25.0 | 66.1    | 62.9 | 61.9             |
| inter   | 0       | 0    | 0     | 0    | 0.1  | 0       | 0    | 0                |
| =90°    | 2.2     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0       | 0.7  | 0.4              |
| >90°    | 0       | 0    | 0     | 0    | 0.1  | 0       | 0    | 0                |
| 45°-90° | 2.9     | 4.8  | 0     | 0    | 0    | 0       | 0    | 1.1              |
| <45°    | 9.2     | 18.1 | 49.0  | 34.6 | 74.7 | 33.9    | 36.4 | 36.6             |
| D303    | fevrier | mars | avril | mai  | juin | juillet | aout | moyenne          |
| haut    | 5.3     | 1.5  | 0     | 0.6  | 0    | 0       |      | 1.2              |
| inter   | 0       | 0    | 0     | 0    | 0    | 0       |      | 0                |
| =90°    | 12.6    | 0    | 1.2   | 0    | 0    | 0       |      | 2.3              |
| >90°    | 0       | 2.3  | 0     | 0.8  | 0    | 7.5     |      | 1.8              |
| 45°-90° | 1.1     | 2.3  | 6.4   | 25.6 | 52.1 | 43.2    |      | 21.8             |
| <45°    | 81.0    | 93.8 | 92.4  | 73.0 | 47.9 | 49.4    |      | 72.9             |
| tous    | fevrier | mars | avril | mai  | juin | juillet | aout | moyenne annuelle |
| haut    | 20      | 22.3 | 14.3  | 14.9 | 11.5 | 19.7    | 38.8 | 17.7             |
| inter   | 4.2     | 9.7  | 6.5   | 4.8  | 3.9  | 5.9     | 6.6  | 6.5              |
| =90°    | 38.5    | 18.8 | 13.3  | 24.1 | 17.9 | 19.6    | 0.2  | 20.1             |
| >90°    | 2.8     | 3.5  | 6.4   | 2.2  | 6.9  | 5.3     | 4.2  | 4.8              |
| 45°-90° | 12.6    | 20   | 29.4  | 32.8 | 26.1 | 27.4    | 23.3 | 25.3             |
| <45°    | 21.8    | 25.7 | 30.1  | 21.2 | 33.6 | 22.1    | 26.9 | 25.6             |

Table 3.4: Fréquence d'utilisation (%) des stores vénitiens dans leurs différentes positions

Au regard de ces fréquences, des différences significatives entre les comportements individuels apparaissent, mais des tendances peuvent cependant être observées. Avant de rentrer dans une analyse de ces résultats, intéressons-nous au premier mois de mesure pour chacun des sujets, et comparons-le aux mois suivants, toujours de façon individuelle. Le mois de février pour les bureaux D204, D204, D206, D207, D302 et D303, et le mois mars pour les bureaux D205 et D208. En effet, on peut observer des différences plus ou moins notoires en ce qui concerne les fréquences d'utilisation de ce premier mois par rapport aux suivants.

Le sujet du bureau D203 place ses lames à l'horizontale durant 42.5 % du temps en février et quasiment plus de cette manière par la suite. Le sujet du bureau D205 utilise ses stores vénitiens en position intermédiaire durant 53.1 % du temps en mars alors que cette position n'est plus sélectionnée ensuite. Le sujet du bureau D206 choisit de placer ses stores baissés lames à l'horizontale pendant 72.4 % du temps en février, alors qu'après, il utilisera moins cette façon d'orienter ses stores vénitiens. Le sujet du bureau D207 place ses stores en position intermédiaire durant 25.1 % du temps en février, cependant cette position ne reste que très peu sélectionnée par la suite. Le sujet du bureau D303 choisit de baisser ses stores lames à l'horizontale durant 12.6 % du temps en février, alors qu'ensuite, cette position n'est plus utilisée. Ces observations nous amènent à émettre deux hypothèses concernant cette différence d'utilisation entre le premier mois d'étude et les suivants:

- Hypothèse 1: Cette différence est due à la prise en main du nouveau système de pilotage des stores vénitiens et éventuellement à leur nouvelle couleur.
- Hypothèse 2: Cette différence est due aux variations du climat lumineux.

La supposition de l'hypothèse 1 nous a été suggérée par le comportement du sujet dans le bureau D205. En effet, si le store est en moyenne utilisé en position intermédiaire durant 13.6 % du temps, cela peut trouver son explication dans le fait que ce sujet n'a passé que 4 mois dans ce bureau. Arrivé en mars, ce sujet n'ayant aucun vécu dans ce bureau, il pourrait sembler logique de conclure que l'utilisation excessive en position intermédiaire des stores au mois de mars (53.1 %) soit due à une découverte de l'espace et une prise en main de la protection solaire motorisée. On peut observer que durant les 3 mois suivants, les positions intermédiaires ne sont plus sélectionnées. Cette tendance peut être observée chez les autres sujets également. On peut observer ces tendances de manière plus ou moins marquée chez les autres sujets, que ce soit entre les mois de février et mars pour les bureaux D203, D204, D206, D207, D302, D303 ou les mois de mars et avril pour les autres. Le simple fait que l'on puisse observer ces différence entre les mois de février et mars pour certains, et mars et avril pour d'autres, nous laisse penser que le phénomène est davantage dû à un aspect comportemental qu'à un aspect météo.

Pour confirmer ou infirmer l'hypothèse 2, examinons les différences climatiques entre ces mois à l'aide des données météo nous informant sur fréquences de types de ciel à Vaulx-en-Velin (données fournies par la station IDMP installée à l'ENTPE [Dumortier, 1995]) durant notre période de mesures. Les tables correspondant à ces données météo sont fournies en annexe 3.

Le tableau 3.5 ci-après nous indique les fréquences de type de ciel subies par chacun des sujets. Ces fréquences varient d'un bureau à l'autre car elles tiennent compte des périodes pendant lesquelles l'occupant était présent dans le bureau.

|      | Type de ciel | Février | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juillet | Août |
|------|--------------|---------|------|-------|------|------|---------|------|
|      | soleil       | 12.5    | 31.6 | 66.7  | 54.5 | 37.5 | 33.3    | 20.0 |
| D203 | variable     | 31.3    | 31.6 | 11.1  | 18.2 | 43.8 | 66.7    | 60.0 |
|      | couvert      | 56.3    | 36.8 | 22.2  | 27.3 | 18.8 | 0.0     | 20.0 |
|      | soleil       | 15.4    | 33.3 | 25.0  | 33.3 | 35.3 | 40.0    |      |
| D204 | variable     | 30.8    | 33.3 | 62.5  | 40.0 | 47.1 | 60.0    |      |
|      | couvert      | 53.8    | 33.3 | 12.5  | 26.7 | 17.6 | 0.0     |      |
|      | soleil       |         | 37.5 | 41.2  | 27.3 | 38.5 |         |      |
| D205 | variable     |         | 37.5 | 29.4  | 36.4 | 38.5 |         |      |
|      | couvert      |         | 25.0 | 29.4  | 36.4 | 23.1 |         |      |
|      | soleil       | 5.6     | 35.0 | 21.4  | 40.0 | 26.7 | 58.3    |      |
| D206 | variable     | 38.9    | 30.0 | 64.3  | 40.0 | 53.3 | 41.7    |      |
|      | couvert      | 55.6    | 35.0 | 14.3  | 20.0 | 20.0 | 0.0     |      |
|      | soleil       | 12.5    | 40.0 | 0.0   |      | 45.5 | 33.3    | 0.0  |
| D207 | variable     | 25.0    | 25.0 | 66.7  |      | 54.5 | 66.7    | 60.0 |
|      | couvert      | 62.5    | 35.0 | 33.3  |      | 0.0  | 0.0     | 40.0 |
|      | soleil       |         | 33.3 | 38.9  | 60.0 | 15.4 | 46.2    | 20.0 |
| D208 | variable     |         | 11.1 | 50.0  | 20.0 | 61.5 | 53.8    | 80.0 |
|      | couvert      |         | 55.6 | 11.1  | 20.0 | 23.1 | 0.0     | 0.0  |

|      | Type de ciel | Février | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juillet | Août |
|------|--------------|---------|------|-------|------|------|---------|------|
|      | soleil       | 13.3    | 36.8 | 42.9  | 46.2 | 47.1 | 37.5    | 14.3 |
| D302 | variable     | 33.3    | 31.6 | 42.9  | 23.1 | 35.3 | 62.5    | 57.1 |
|      | couvert      | 53.3    | 31.6 | 14.3  | 30.8 | 17.6 | 0.0     | 28.6 |
|      | soleil       | 11.1    | 46.7 | 33.3  | 18.2 | 27.3 | 50.0    |      |
| D303 | variable     | 33.3    | 33.3 | 50.0  | 45.5 | 54.5 | 50.0    |      |
|      | couvert      | 55.6    | 20.0 | 16.7  | 36.4 | 18.2 | 0.0     |      |

**Table 3.5:** Fréquences de types de ciel pour chacun des bureaux

La comparaison des données des mois de février et mars est sans appel : il est clair que le mois de mars (ainsi que les suivants) a été nettement plus ensoleillé que le mois de février (deux à sept fois plus). Cela pourrait donc expliquer le fait que les stores vénitiens aient plus été utilisés de manière à laisser passer davantage de lumière durant le mois de février que les suivants.

En revanche la différence d'utilisation du store entre les mois de mars et avril pour les bureaux D205 et D208 ne semble pas réellement trouver d'explication dans les différences climatiques.

Nous nous trouvons donc face à un problème, l'hypothèse 1 semble se vérifier pour les bureaux D205 et D208, alors que, pour les autres bureaux, il semblerait que ce soit davantage les variations climatiques qui expliquent les différences d'utilisation des protections solaires entre février et mars.

Il faut cependant faire un choix qui consiste à savoir si nous considérons que le premier mois de mesure est, dans notre cas, une période où l'individu découvre ses nouvelles protections solaires, ou bien s'il s'adapte rapidement et agit tout de suite en fonction des conditions climatiques.

Si nous retenons la première hypothèse, nous pourrons exclure le premier mois de mesure de l'analyse de nos données, en revanche si l'on retient la seconde hypothèse, nous conserverons la totalité de nos données.

Donc même s'il paraîtrait assez logique que les individus aient besoin d'une période d'adaptation à leur nouveau système de protection solaire, l'analyse des données météo nous indique quand même qu'il existe des variations climatiques fortes entre février et mars. Par conséquent, au risque de laisser un peu inexpliqué le comportement du sujet D205 durant les deux premiers mois de mesure, nous allons retenir l'hypothèse 2 et conserver la totalité de nos données dans la suite de nos traitements.

Ce point étant à présent éclairci, nous pouvons nous intéresser au mode de fonctionnement individuel de chacun des sujets face à sa protection solaire.

En examinant les données, on peut classer les sujets en trois modes de fonctionnement.

- Mode 1 : Les stores sont totalement baissés de manière quasi permanente.
- Mode 2 : Les stores sont soit totalement remontés, soit totalement baissés.
- Mode 3 :Les stores sont utilisés dans toute leur dynamique, y compris dans les positions intermédiaires.

On peut ainsi attribuer à chacun des sujets un mode de fonctionnement, voir table 3.6.

| Mode de fonctionnement | Bureaux                      |
|------------------------|------------------------------|
| 1                      | D203, D204, D205, D206, D303 |
| 2                      | D207, D302                   |
| 3                      | D208                         |

Table 3.6 : Classement des sujets selon le mode d'utilisation de leur protection solaire.

On s'aperçoit que finalement, sur les huit sujets, sept utilisent leurs stores vénitiens en position "tout et/ou rien". Ce qui tend à confirmer notre hypothèse de départ.

En ce qui concerne le bureau D205 nous avons estimé, malgré l'utilisation du mois de mars en mode 3, que ça n'était pas représentatif de son comportement moyen, c'est pourquoi, même si nous conservons ces données dans le calcul des moyennes, nous estimons qu'il est plus cohérent de classer le sujet du bureau D205 dans le mode 2, plutôt que dans le mode 3.

Au final, nous considérerons quand même les modes 2 et 3 de la même manière étant donné que le mode 3 n'est autre que le mode 2 avec en plus des positions intermédiaires. D'autre part, nous n'étudierons pas l'inclinaison des lames du store lorsqu'il est en position intermédiaire.

On peut d'ores et déjà dessiner des profils pour quelques-uns de nos sujets.

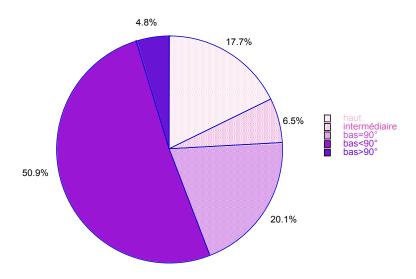
Les sujets des bureaux D204 et D302 affichent clairement un comportement photophile. Les lames du store sont en quasi-permanence à l'horizontale pour le premier (86.5 % du temps en moyenne), et le store est totalement remonté pour le second durant 61.9 % du temps.

En revanche le sujet D303 semble avoir un comportement plutôt radical avec ses stores vénitiens. En effet, son store est en position basse, lames inclinées à moins de 45°, durant 72.9 % du temps en moyenne. Son comportement aurait-il quelque chose à voir avec la position de son écran de visualisation? Nous aborderons ce point dans le cadre de l'hypothèse 9.

# III.6.5.2. Utilisation moyenne.

Intéressons nous à présent à la moyenne totale, sur toute la période de mesure, tous sujets confondus, d'utilisation du store vénitien. Sur la figure 3.7, on représente la fréquence moyenne d'utilisation du store vénitien dans ses différentes positions. Cinq catégories sont envisagées :

- 1. le store est totalement remonté.
- 2. le store est dans un position intermédiaire.
- 3. le store est totalement baissé, lames à l'horizontale.
- 4. le store est totalement baissé, lames inclinées à moins de 90° (vers le sol).
- 5. le store est totalement baissé, lames inclinées à plus de 90° (vers le ciel).



**Figue 3.7:** Fréquence moyenne d'utilisation du store vénitien, pour les huit sujet, entre le 23 janvier et le 1<sup>er</sup> septembre 2002.

On constate que, en moyenne, l'hypothèse est confirmée. En effet, les positions intermédiaires ne sont choisies que dans 6.5 % des cas. Le reste du temps, les stores sont totalement remontés (pendant 17.7 % du temps), ou bien totalement baissés (75.8 % du temps).

On constate donc que, en majorité, le store vénitien est totalement baissé. La position des lames à l'horizontale est utilisée pendant 20.1 % du temps. En revanche c'est la l'inclinaison des lames vers le sol extérieur (<90°) qui est préférée la majorité du temps. En effet, on observe que pendant 50.9 % du temps les sujets choisissent d'incliner les lames de leurs stores vénitiens de cette manière. Ce choix est assez censé, étant donné que si les lames sont inclinées vers le ciel (angle > 90°), la protection contre les fortes luminances de ciel et surtout le rayonnement solaire direct est inefficace. Cette plage d'inclinaison des lames n'est d'ailleurs choisie par les sujets que durant 4.8 % du temps.

Nous pouvons également tirer de nos mesures des conclusions concernant l'utilisation de la seconde baie dans le cas des trois bureaux doubles (D204, D302 et D303). Il apparaît que les protections solaires sur la baie qui est la plus éloignée du poste de travail ne sont que très rarement manipulées. En effet, seulement 18 actions sur la baie la plus éloignée de l'occupant ont été enregistrées durant les trente semaines de mesures, dans ces trois bureaux.

# III.6.5.3. Conclusions sur l'hypothèse 5.

L'hypothèse est confirmée par l'analyse des mesures. Les stores sont soit totalement montés, soit totalement baissés et l'utilisateur n'agit que sur l'inclinaison des lames.

On peut d'ores et déjà établir une tendance moyenne, un scénario d'utilisation du store vénitien piloté par un automatisme. Les positions intermédiaires et lames baissées, inclinaison vers le ciel, peuvent être exclues des scénarios d'utilisation. Le profil moyen d'utilisation pourrait se diviser en trois modes :

Mode 1 : le store est totalement remonté.

Mode 2 : le store est totalement baissé, lames à l'horizontale.

Mode 3 : le store est totalement baissé, lames inclinées vers le sol extérieur.

Le passage du premier au second temps sera envisagé dans le cadre de l'hypothèse 6. Et la valeur de l'inclinaison des lames du troisième temps est déduite du modèle exposé dans le chapitre 2, qui sera cependant modifié à l'aide des conclusion de la campagne de mesures. Nous exposerons les modifications dans le chapitre 4.

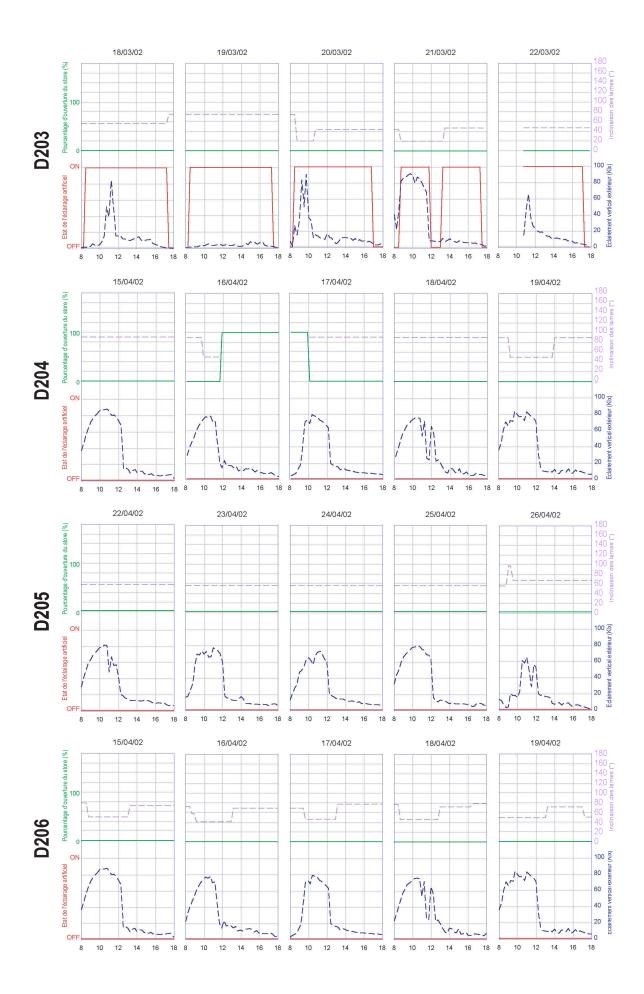
# III.6.6. Hypothèse 6 (seuils de déclenchement du store).

Avant de tester en détail les hypothèses 6.1, 6.2 et 6.3, regardons de manière individuelle l'évolution de la position des stores en fonction de la valeur de l'éclairement en façade. Nous effectuerons en premier lieu un suivi au quotidien sur une semaine pour chacun des bureaux. Cette opération a pour but de montrer que, même si chaque sujet est en général relativement cohérent avec lui-même, des comportements contradictoires peuvent apparaître. Une fois cette analyse quotidienne effectuée, nous évaluerons le comportement moyen de chacun des sujets sur les trente semaines d'acquisition, en étant toutefois conscients des dangers que présentent ce type de moyennage.

# III.6.6.1. Utilisation individuelle des stores au quotidien.

Pour chacun des huit bureaux, nous avons examiné la façon dont les sujets ont utilisé les stores vénitiens sur une semaine entière. Les sujets n'étant pas forcément présents aux mêmes moments, les graphiques présentés ne correspondent pas nécessairement à la même semaine.

Sur la figure 3.8, on peut suivre, pour chacun des bureaux, l'évolution quotidienne de quatre paramètres : le niveau d'éclairement sur la baie, l'état de l'éclairage artificiel (allumé ou éteint), le pourcentage d'ouverture du store (100 = totalement ouvert, 0 = totalement fermé) ainsi que l'inclinaison des lames (voir figure 2.5 chapitre 2 pour référence).



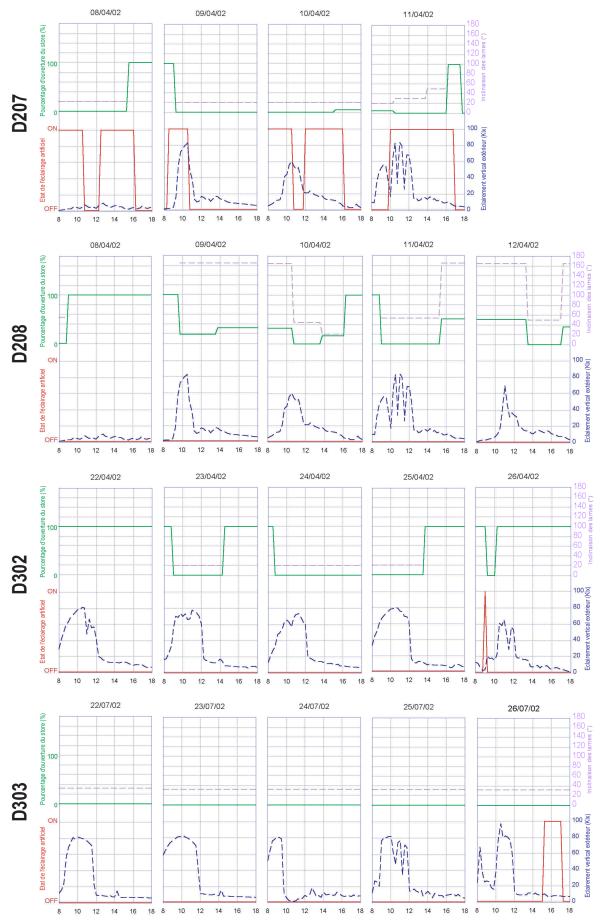


Figure 3.8 : Evolution de l'utilisation des stores vénitiens au quotidien.

Un premier regard à ces graphiques nous confirme que, globalement, les actions effectuées sur les stores se font en corrélation avec le niveau d'éclairement vertical extérieur. En effet, la majorité des actions sur le store vénitien suivent l'évolution des conditions lumineuses extérieures. Des exceptions apparaissent toutefois.

La façade est orientée Sud-Est, par conséquent, le rayonnement solaire direct atteint potentiellement la baie uniquement le matin.

Plusieurs types d'actions sur le store vénitien sont identifiables.

# 1/ Occultation de la baie lorsque l'éclairement sur la baie augmente.

Comme la logique laissait sous-entendre, les stores sont actionnés lorsque le niveau de lumière disponible à l'extérieur augmente. Si l'on juge les résultats des semaines présentés sur la figure 3.8. Seuls les sujets de bureaux D205 et D208 peuvent parfois occulter la baie à un moment où l'éclairement sur la baie n'est pas particulièrement élevé, les raisons de ce type de comportement sont toutefois difficilement identifiables.

En ce qui concerne les six autres bureaux, on peut observer que l'action d'occultation est toujours effectuée lorsque le niveau d'éclairement sur la baie est élevé. Cependant, s'il semble que ce paramètre est une condition nécessaire, ça n'est visiblement pas une condition suffisante, à en juger par certains comportements. On peut en effet parfois trouver des situations où le sujet va tolérer un fort niveau de lumière sans pour autant actionner sa protection solaire, alors qu'il l'aurait fait un autre jour dont le climat était similaire, c'est le cas des sujets des bureaux D204 et D302, pour les semaines considérées dans cet exemple précis.

# 2/ Occultation de la baie en préventif, le soir avant de guitter le bureau.

Les bureaux étant orientés Sud-Est, le soleil direct est présent le matin. Afin d'éviter d'arriver dans un bureau surchauffé, certains sujets choisissent de fermer leur store avant de partir. En effet, ce type d'action, observée chez le sujet du bureau D206, n'est visiblement pas due à un niveau d'éclairement sur la baie trop élevé. Ce phénomène a également été observé chez les autres sujets dès l'arrivée des beaux jours.

## 3/ Aucune action sur la protection solaire quel que soit le climat.

Ce type de comportement peut être dû à plusieurs phénomènes. En ce qui concerne le sujet du bureau D204, hormis le fait qu'il aime travailler sous des niveaux de lumière élevés, l'absence d'actions lorsque le niveau d'éclairement sur la baie est élevé (15 et 18 avril) semble due au fait que ce sujet est parfois amené à s'absenter de son bureau.

Le bureau D205 est occupé à mi-temps, les matins uniquement. Ce qui peut expliquer le fait que les stores restent dans la même position durant la semaine présentée ici.

En ce qui concerne le bureau D303, la table 3.3 nous montre que c'est le sujet qui utilise le moins sa protection solaire. Ce résultat est confirmé par l'examen des positions qu'il donne à son store durant une semaine. Il semblerait donc qu'un autre paramètre prenne le dessus sur le niveau d'éclairement sur la baie. Cet aspect sera étudié dans le cadre de l'hypothèse 9.

4/ Le store est ouvert lorsque l'éclairement extérieur devient faible.

La majorité des actions sur le store destinées à laisser entrer davantage de lumière naturelle se font, comme on peut l'imaginer, quand le niveau d'éclairement sur la baie. On observe distinctement ce phénomène sur les graphes de la figure 3.8.

La façade étant orientée sud-est, ce type d'action apparaît essentiellement en début d'après-midi. Il peut donc paraître difficile de savoir si les sujets remontent leur store parce qu'ils reviennent de leur pause déjeuner ou bien parce qu'ils manquent de lumière. D'autre part, on peut observer que le store est en général relevé à un niveau d'éclairement sur la baie plus faible que celui auquel il a été baissé. Ce phénomène de décalage ou d'hystérésis entre l'ouverture et la clôture du store sera étudié en détail dans le cadre de l'hypothèse 6.3.

On peut également observer sur les graphiques de la figure 3.8, le comportement des sujets face à l'utilisation de l'éclairage artificiel. Si la majorité n'utilise pas ou peu l'éclairage artificiel, il n'en est pas de même pour les sujets des bureaux D203 et D207. Nous reviendrons sur cet aspect dans le cadre de l'hypothèse 7.

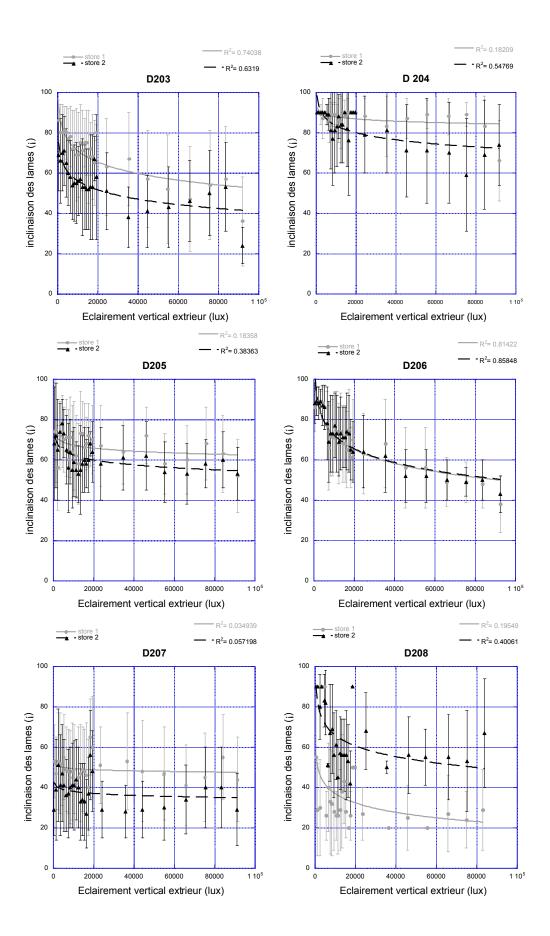
Comme il n'était pas facile d'analyser les résultats quotidiens des huit sujets durant trente semaines, nous avons moyenné les valeurs données à l'inclinaison des lames du store par chacun des sujets en fonction de la valeur de l'éclairement sur la baie.

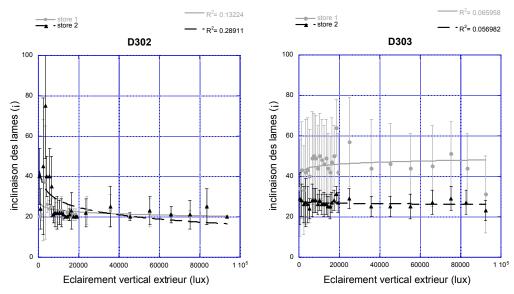
### III.6.6.2. Utilisation des stores en mode 1.

Nous allons présenter ici la variation de l'inclinaison des lames lorsque le store vénitien est baissé totalement. Comme il est montré sur la figure 3.7, les lames sont inclinées vers le ciel durant une très faible proportion du temps, c'est pourquoi nous avons décidé de ne représenter que les inclinaisons inférieures à 90°. Sur chaque graphique, on a tracé deux courbes, une correspond au petit store (store 1) et l'autre au grand store (store 2) dont chaque fenêtre est équipée (voir descriptif des bureaux dans l'annexe 1).

On représente entre 0 et 20 klux les valeurs moyennes de l'inclinaison par tranche de 1000 lux, pour la valeur moyenne de l'éclairement correspondante, accompagné de sa barre d'erreur exprimant l'écart-type associé. Au-delà de 20 klux, on moyenne les points par tranche de 5 klux, étant donné que la répartition en fréquence de points pour les valeurs élevées de l'éclairement diminue, il n'eût pas été significatif de représenter les points par tranche de 1000 lux.

Sur chaque graphique, on représente également la courbe de tendance logarithmique (c'est le type de régression qui a donné la meilleure corrélation avec les données) dont on donne également le coefficient de régression R<sup>2</sup>. Cette opération n'a pas pour but de proposer une modélisation du phénomène, mais uniquement d'aider à visualiser plus facilement les variations, et de rendre les comparaisons entre les sujets, plus aisées.





**Figure 3.9:** Variation de l'inclinaison des lames en fonction de l'éclairement sur la façade lorsque le store est totalement baissé.

Un premier regard à ces graphiques (figure 3.9) nous montre qu'il peut y avoir de fortes variations d'utilisation du store vénitien entre les individus.

Pour comparer des comportements comparables, il faut garder en mémoire que les sujets des bureaux D207, D208 et D302 utilisent leur store en mode 2. Par conséquent, il ne faut pas regarder de la même manière les courbes de variation de l'inclinaison des lames pour ces trois bureaux et pour les autres. Si l'on regarde par exemple le cas du bureau D302, on s'aperçoit que l'occultation est sévère cependant, cela ne traduit que moins de 40 % de son comportement étant donné que son store est totalement remonté durant 61.9 % du temps. Ce sujet utilise la hauteur du store, plutôt que l'inclinaison des lames, pour occulter la lumière entrant dans son bureau. Il n'est donc pas surprenant de voir que lorsque les stores sont baissés, les lames sont inclinées quasiment au maximum en permanence.

Les sujets des bureaux D203 et D206 ont des comportements lumineux relativement similaires. En effet, on observe dans les deux cas une forte dynamique entre 0 et 20 klux, alors que pour des niveaux plus élevés, les variations d'inclinaison de lames sont plus modérées.

Le sujet du bureau D204 confirme sa préférence pour les forts niveaux de lumière, en effet, on observe la tendance annoncée par le tableau 3.4, à savoir que les lames sont inclinées à l'horizontale ou presque, en quasi-permanence.

De même pour le bureau D303, on s'aperçoit que le sujet choisit de manière quasipermanente des inclinaisons de lames très occultantes, en majorité inférieures à 45°. Pour ce qui est des différences d'utilisation entre le petit store et le grand store, on s'aperçoit qu'en général, le petit store est moins occultant que le grand, c'est-à-dire que les lames sont placées à des inclinaisons moins fortes que pour le grand store (ce phénomène ne se vérifie cependant pas pour le bureau D208). Comme si la petite fenêtre permettait d'apporter un peu de la lumière naturelle supprimée à la grande.

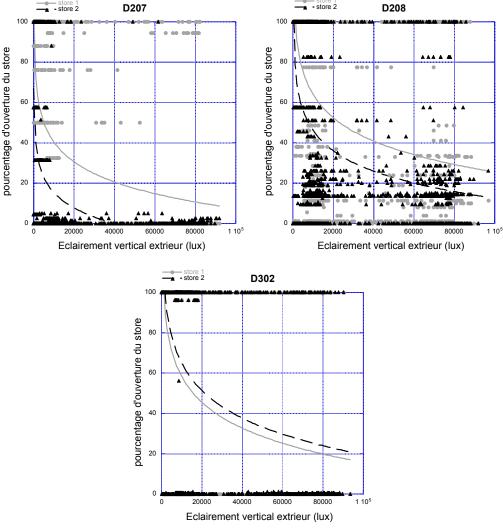
On s'aperçoit d'autre part que les variations semblent être parallèles.

On peut observer également le cas étonnant du bureau D206 où le sujet règle ses deux protections solaire exactement de la même façon. Le coefficient de corrélation est d'autre part très élevé pour des mesures de ce type, ce qui nous montre une grande cohérence du sujet en termes d'utilisation de ses protections solaires.

## III.6.6.3. Utilisation en mode 2.

Regardons ici le cas des bureaux D207, D208 et D302 qui utilisent toute la gamme de hauteur offerte par leurs stores vénitiens.

On trace, figure 3.10, les données brutes des hauteurs du store vénitien données par ces trois sujets. Les courbes de tendance nous permettent de juger de la répartition des points et de leur densité dans les différentes zones où il est difficile de les distinguer, comme pour le bureau D302 qui utilise ses stores en position haute ou basse, mais jamais à l'intermédiaire.

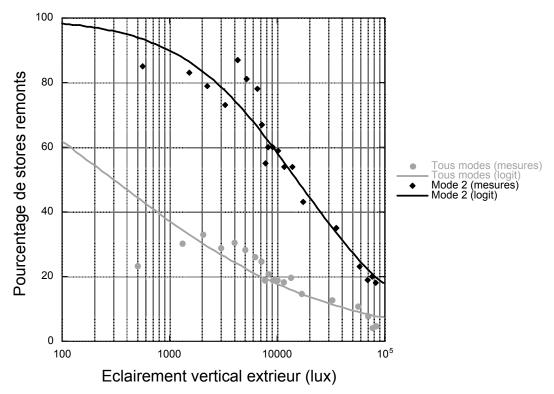


**Figure 3.10:** Variation de la hauteur du store en fonction de l'éclairement sur la façade (fonctionnement en mode 2).

# III.6.6.4. Hypothèse 6.1 (seuil d'éclairement vertical extérieur).

Nous nous intéressons ici au seuil de déclenchement des stores vénitiens, c'est-àdire le seuil d'éclairement vertical extérieur à partir duquel le sujet le fait passer de la position haute à la position basse exclusivement. En effet, la méthode utilisée ici ne permet de considérer que des variables prenant deux états uniquement.

Nous examinerons le seuil pour les 3 bureaux qui fonctionnent en mode 2, puis celui de la totalité des bureaux. A l'aide de la méthode du Logit, nous pouvons exprimer la proportion de stores ouverts en fonction du logarithme de l'éclairement vertical extérieur.



**Figure 3.11:** Variation de la proportion de stores ouverts en fonction de Log(Eext) pour le fonctionnement en mode 2 et tous modes confondus.

Sur ce graphe (figure 3.11) on s'aperçoit que, logiquement, pour un même niveau d'éclairement sur la façade, il y a moins de stores ouverts si l'on considère la totalité des sujets que si l'on considère uniquement les trois qui fonctionnent en mode 2.

La proportion de stores ouverts calculée par la méthode du Logit est donnée par:

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = 7.83013 - 1.87337 \times \log(E_{ext}), R^2 = 0.8844, \text{ (mode 2)}. \text{ (éq. 3.4)}$$

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = 2.5166 - 1.0159 \times \log(E_{ext}), R^2 = 0.7472$$
, (tous modes confondus). (éq. 3.5)

La lecture de ces graphes nous apprend que 50 % de la totalité des stores sont fermés dès 300 lux en façade, alors que si l'on ne considère que les sujets qui manipulent leur store en mode 2 (D207, D208 et D302), la même proportion de stores est fermée à 15 klux.

Et à ce même seuil de 15 klux, déjà 85 % de la totalité des stores étudiés sont baissés (ou 15 % sont ouverts).

En ce qui concerne l'hypothèse de départ, on s'aperçoit qu'à 8000 lux, 62 % des stores utilisés en mode 2 sont encore ouverts, contre 19 % de la totalité des stores.

# III.6.6.5. Hypothèse 6.2 (seuil de luminance de baie).

Lorsqu'il s'agit de perception de la lumière, il est souvent plus pertinent de parler de luminances que d'éclairements. C'est pourquoi nous avons cherché à comprendre quel est l'ordre de grandeur des luminances de baie qui sont tolérées au maximum par nos sujets.

Pour cela il fallait dans un premier temps évaluer la luminance de la baie perçue depuis l'intérieur du bureau à partir de la donnée de l'éclairement sur la façade. Ces calculs sont estimatifs. En effet, il n'est pas simple de calculer la luminance de la baie uniquement à partir une valeur d'éclairement.

Nous émettons l'hypothèse que nos sujets utilisent leur store vénitien de manière à ce que le rayonnement solaire direct soit bloqué par ce dernier. Ainsi on peut utiliser la formule de Lambert pour calculer la luminance de la baie.

$$\pi \times L_{baie} = \tau_{baie} \times E_{vertext}$$
 (éq. 3.6)

L<sub>baie</sub> est la luminance de la baie.

 $\tau_{\text{baie}}$  est le facteur de transmission de la baie.

E<sub>vertext</sub> est la valeur de l'éclairement vertical extérieur.

Nous avons déterminé la fonction de transfert hémisphérique-hémisphérique du store vénitien noir à l'aide de mesures sur maquettes (voir figure 2.12) en fonction de l'angle d'inclinaison des lames. On exprime la variation du facteur de transmission (en %), pour les store noir, en fonction de l'angle d'inclinaison des lames  $\alpha\Box$  (en degrés) entre 20 et 90° par l'équation (déduite des mesures):

$$\tau_{h-h}(\alpha) = -41.926 + 3.3827 \times \alpha - 0.057571 \times \alpha^2 + 3.4167.10^{-4} \times \alpha^3$$
, R<sup>2</sup>=0.994 (éq 3.7)

Les angles supérieurs à 90° n'ont pas été étudiés, dans la mesure où ils ne représentent qu'une faible proportion d'utilisation (4.8 % en moyenne). D'autre part, la fonction de transfert pour les angles supérieurs à 90° a été établie à l'aide de mesures sur maquettes sous ciel artificiel, or, il faut garder en mémoire que la façade étudiée est équipée de casquettes brise-soleil ce qui modifie la fonction de transfert du store pour des angles élevés (>90°).

Le facteur de transmission moyen de la baie, tenant compte de la hauteur du store, de l'inclinaison des lames et de la transmission du vitrage vaut donc:

$$\tau_{baie} = \tau_{vitrage} \times \left( \frac{S_{1} \left( \tau_{h-h} (\alpha_{1}) \times \left( \frac{100 - h_{1}}{100} \right) + \frac{h_{1}}{100} \right) + S_{2} \left( \tau_{h-h} (\alpha_{2}) \times \left( \frac{100 - h_{2}}{100} \right) + \frac{h_{2}}{100} \right)}{S_{1} + S_{2}} \right)$$

(éq. 3.8) où:

 $\tau_{\text{vitrage}}$  est le facteur de transmission du vitrage clair, il vaut 70 %.

 $\tau_{\text{h-h}}(\alpha_i)$  est le facteur de transmission hémisphérique-hémisphérique du store vénitien.  $\alpha_i$  est l'inclinaison des lames du store de la fenêtre i (1 ou 2).

h<sub>i</sub> est le pourcentage de surface vitrée découvert (100=store ouvert, 0= store fermé) S<sub>i</sub> est la surface de la fenêtre i

D'où:

$$L_{baie} = \frac{\tau_{baie} \times E_{vertext}}{\pi} \text{ (éq. 3.9)}$$

Ainsi, toutes les quinze minutes, nous avons calculé la luminance moyenne de la baie en tenant compte de la hauteur et de l'inclinaison des lames du store de la petite et de la grande fenêtre.

On trace sur la figure 3.12, la répartition en fréquence de ces luminances de baie pour chacun des bureaux et en moyenne.

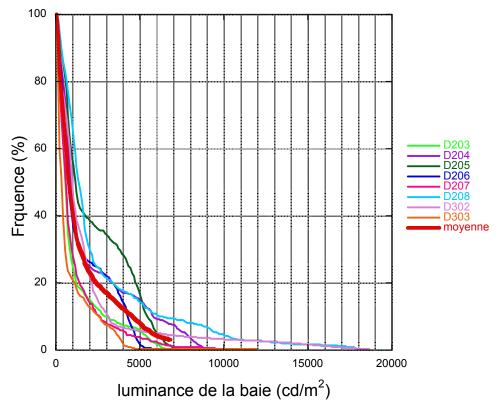


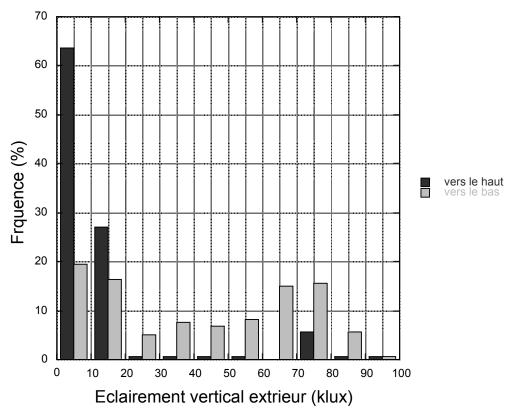
Figure 3.12: Fréquence de dépassement des luminances de baie.

Notre hypothèse de départ supposait que les luminances de baie n'excèdent pas 1800 cd/m2. L'analyse en fréquence nous montre que cette valeur est dépassée entre 15 et 40 % individuellement, et 25 % en moyenne.

# III.6.6.6. Hypothèse 6.3 (hystérésis).

Concernant l'effet d'hystérésis sur les seuils de manipulation du store pour plus et moins d'occultation, l'analyse des données fournit des résultats qui confirment l'hypothèse.

Si l'on compare les seuils de déclenchement du store, en hauteur uniquement, vers le bas et vers le haut, à l'aide d'une analyse en fréquence, on obtient les variations détaillées sur le graphe de la figure 3.13.



**Figure 3.13:** Fréquence de dépassement des seuils de déclenchement des protections solaires, vers le haut et vers le bas.

On observe que les stores sont remontés lorsque l'éclairement sur la baie est inférieur à 20 klux pendant 90 % du temps, alors qu'à ce même seuil seulement 35 % des actions visant à occulter la baie ont été effectuées.

On observe d'autre part, que proportionnellement, on compte autant d'actions visant à occulter que d'actions visant à découvrir la baie. Il n'est donc pas aberrant de conclure qu'une action d'ouverture est suivie par une action de fermeture.

Si l'on analyse, parmi le total des 832 actions effectuées par les sujets sur les stores, uniquement les actions qui consistent à monter ou baisser le store (comme elles sont représentées sur la figure 3.13), on trouve un écart moyen de 28 klux. En effet, si les stores sont baissés à une valeur moyenne de 41 klux, ils sont remontés autour d'une valeur moyenne de 13 klux.

Si la valeur de l'écart est proche de celui trouvé par Reinhart [Reinhart, 2001] (24 klux, contre 28 klux ici), nous trouvons des seuils de déclenchement inférieurs: 49 klux pour la fermeture, contre 41 klux ici, et 25 klux pour l'ouverture, contre 13 klux ici.

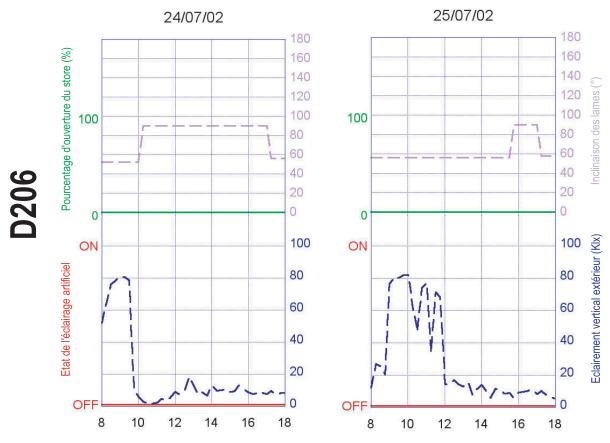
On peut également considérer le total des actions, c'est-à-dire celles qui sont effectuées sur la hauteur du store, mais aussi celles effectuées sur l'inclinaison des lames. L'analyse des résultats nous donne un seuil d'augmentation de l'indice d'occlusion de la baie (occultation plus forte, moins de lumière naturelle) situé en moyenne à 37 klux, et un seuil moyen de diminution de cet indice (occultation moins forte, plus de lumière naturelle) de l'ordre de 18 klux. La notion d'indice d'occlusion est, sans la définir dans le détail, une quantité qui traduit la quantité de lumière transmise par la baie tenant compte à la fois de la hauteur du store et de l'inclinaison des lames [Foster, 2001].

Il faut cependant garder en mémoire les graphiques quotidiens de la figure 3.8. En effet, l'orientation de la façade (sud-est) amenait souvent les sujets à ouvrir le store en début d'après-midi, si celui-ci avait été fermé le matin. Une question a été soulevée: les stores sont ils remontés en début d'après-midi parce que la lumière naturelle dans le bureau est trop faible ou bien parce que les sujets reviennent de leur pause déjeuner?

Les résultats trouvés par Reinhart [Reinhart, 2001] mettent également en évidence cet effet d'hystérésis sur une façade orientée Sud-Ouest. Il n'est pas précisé à quel moment de la journée les stores étaient remontés, mais on peut supposer qu'au regard de l'orientation, un phénomène similaire à celui qui nous préoccupe ici a pu se produire. En effet, il ne semble pas aberrant de dire que les stores étaient baissés au cours de la journée et laissés fermés tout l'après-midi en raison de la présence de soleil direct, et remontés seulement le matin suivant, à l'arrivée de l'occupant dans son bureau.

D'autre part, les fréquences d'ouverture et de fermeture des stores suivent une tendance similaire à celle qui est présentée sur la figure 3.13. On observe en effet chez Reinhart les deux bosses dans la répartition en fréquence des actions de fermeture du store que l'on peut observer sur la figure 3.13. Les actions de fermeture du store lorsque l'éclairement est inférieur à 20 klux peuvent refléter les quelques situations où les sujets qui utilisent leur store en mode 1 agissent sur la hauteur du store (voir table 3.4), ou encore le comportement des sujets qui fonctionnent en mode 2 et baissent leur store à des niveaux d'éclairement extérieur relativement faibles (cas du bureau D207, voir figure 3.10). Pour les actions d'occultation aux forts niveaux d'éclairement, elles reflètent les comportements des sujets des bureaux D208 et D302, pour qui le store n'est pas toujours fermé aux forts niveaux d'éclairement extérieur (voir figure 3.10).

Nous avons néanmoins trouvé plusieurs situations où nos sujets ont remonté le store en cours de matinée ou d'après-midi en réponse à l'éclairement sur la baie. Sur la figure 3.14, on peut observer ce phénomène sur deux jours consécutifs du mois de juillet pour le sujet du bureau D206, celui qui sur la figure 3.8 remontait son store en début d'après-midi.



**Figure 3.14:** Variation de l'inclinaison des lames du store en fonction de l'éclairement vertical extérieur.

Le store est actionné soit rapidement après la chute de l'éclairement sur la baie, soit relativement longtemps après. Ce qui nous confirme une tolérance plus élevée aux situations de manque de lumière naturelle qu'aux situations éblouissantes, et tend à confirmer l'effet d'hystérésis de l'hypothèse.

# III.6.6.7. Conclusions sur l'hypothèse 6.

Après analyse des données, on s'aperçoit que les modifications à apporter à nos hypothèses de départ sont minimes.

En ce qui concerne le seuil de déclenchement du store vers le bas, on préférera conseiller 15 klux plutôt que 8 klux. C'est en effet le seuil à partir duquel la moitié des stores utilisés en mode 2, sont baissés

Le seuil de 1800 cd/m² de luminance de baie proposé par Velds [Velds, 1999] semble être vérifié pour 75 % des cas.

Enfin, les constats de Inoue [Inoue, 1988] et Reinhart [Reinhart, 2001] sont largement confirmés par l'analyse de nos données. Il existe bien un écart considérable entre le niveau d'éclairement vertical extérieur de déclenchement des stores vers le bas et vers le haut. L'hypothèse d'hystérésis est vérifiée.

# III.6.7. Hypothèse 7 (utilisation de l'éclairage artificiel).

### III.6.7.1. Résultats.

L'idée est de montrer ici que la couleur sombre des lames des stores vénitiens peut entraîner une utilisation excessive de l'éclairage artificiel. Avant d'analyser en détail le lien entre l'état de l'éclairage artificiel et la position du store, regardons à quelle fréquence l'éclairage artificiel est utilisé par chacun des sujets, voir table 3.7.

| Etat de l'éclairage artificiel | D203 | D204 | D205 | D206 | D207 | D208 | D302 | D303 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ON                             | 62.2 | 28.8 | 19.1 | 25.2 | 47.9 | 5.8  | 22.4 | 32.6 |
| OFF                            | 37.8 | 71.2 | 80.9 | 74.8 | 52.1 | 94.2 | 77.6 | 67.4 |

Table 3.7: Fréquence d'utilisation individuelle de l'éclairage artificiel en %.

On peut observer que l'éclairage artificiel est allumé pendant des durées assez extrêmes d'un bureau à l'autre. Par exemple le sujet du bureau D203 garde son éclairage artificiel allumé durant 62.2 % du temps, alors que celui du bureau D208 l'allume durant 5.8 % du temps seulement.

Si des écarts aussi importants peuvent être expliqués par des différences de comportement, d'habitude et de préférences lumineuses, il semblerait qu'il y ait également un lien avec l'utilisation des protections solaires.

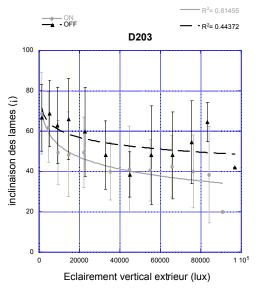
Les bureaux D204, D302 et D303 sont à exclure de cette hypothèse étant donné qu'ils disposent de deux baies. La plus proche de leur poste de travail étant utilisée pour garder de bonnes conditions de confort visuel, à l'aide du store, et la seconde, n'étant que rarement occultée par le store, permet de garantir un bon niveau d'éclairage naturel dans le bureau.

Dans le bureau D208 les stores sont totalement remontés ou en position intermédiaire durant plus de 70 % du temps, ce qui explique le fait que l'éclairage artificiel ne soit que très peu allumé, la baie apportant un maximum de lumière naturelle, probablement aux dépens du confort visuel.

Les sujets des bureaux D205 et D206 inclinent les lames de leurs stores à moins de 90° pendant environ 50 % du temps, ce qui pourrait expliquer une utilisation tempérée de l'éclairage artificiel.

Ce sont les sujets des bureaux D203 et D207 qui utilisent le plus l'éclairage artificiel. L'inclinaison des lames à moins de 45° durant près de 40 % à l'intérieur du bureau D207 empêche une quantité importante de lumière naturelle de pénétrer dans la pièce. Ce phénomène étant très accentué à cause de la couleur noire des lames du store. D'où un recours plus fréquent à la lumière artificielle. Une explication identique peut être donnée pour justifier le comportement du sujet du bureau D203 qui incline les lames de ses stores à moins de 90° durant plus de 75 % du temps.

On peut d'autre part juger visuellement de l'influence d'une inclinaison excessive des lames en comparant l'évolution de l'inclinaison des lames en fonction de l'éclairement vertical extérieur lorsque l'éclairage artificiel est allumé ou éteint. Voir le cas du bureau D203 sur la figure 3.15.



**Figure 3.15:** Exemple de variation de l'inclinaison des lames lorsque l'éclairage artificiel est allumé et éteint.

On peut comprendre d'après ce graphique qu'à un même niveau d'éclairement extérieur, si les lames sont plus inclinées que nécessaire, alors l'éclairage artificiel devra être allumé pour garantir un niveau de lumière suffisant à l'intérieur du bureau. On peut penser, même si nous n'avons pas pu effectuer la comparaison, que si les lames du store vénitien n'avaient pas été noires, l'utilisation de l'éclairage artificiel aurait été différente.

# III.6.7.2. Conclusion sur l'hypothèse 7.

On observe effectivement que l'éclairage artificiel sera utilisé de manière excessive si les stores vénitiens sont occultés plus que nécessaire, et qu'ils sont à lames trop sombres.

C'est une observation qui vient confirmer le fait qu'un automatisme de protection solaire a pour but d'une part de permettre d'occulter la lumière naturelle extérieure de manière à garantir un maximum de confort pour l'individu, mais d'autre part de redonner de la lumière naturelle dès lors que les niveaux lumineux à l'intérieur du bureau ne sont plus suffisants pour permettre de bonnes conditions de visibilité.

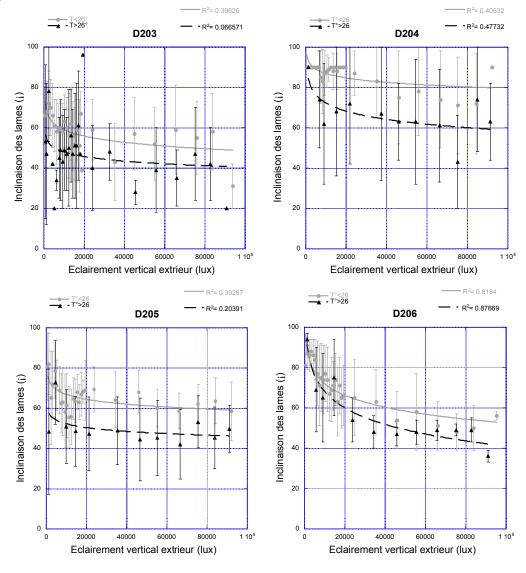
# III.6.8. Hypothèse 8 (influence de la température intérieure).

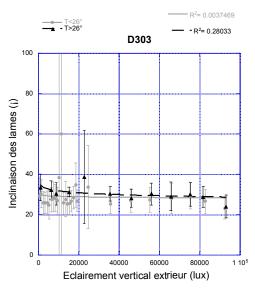
## III.6.8.1. Résultats.

Nous cherchons ici à vérifier si la température ambiante à l'intérieur du bureau a une influence sur les seuils de déclenchement de la protection solaire.

Les recommandations sur le confort d'été [ISO, 1995] nous indiquent que la limite entre confort et inconfort thermique se situe à 26°C.

Nous avons donc divisé la totalité des données mesurées en deux catégories, endessous et au-dessus de 26°C. Nous pouvons ainsi, comme précédemment, regarder l'évolution de l'inclinaison des lames ou de la hauteur du store vénitien, pour chaque bureau et pour ces deux plages de température distinctes (voir figure 3.16).





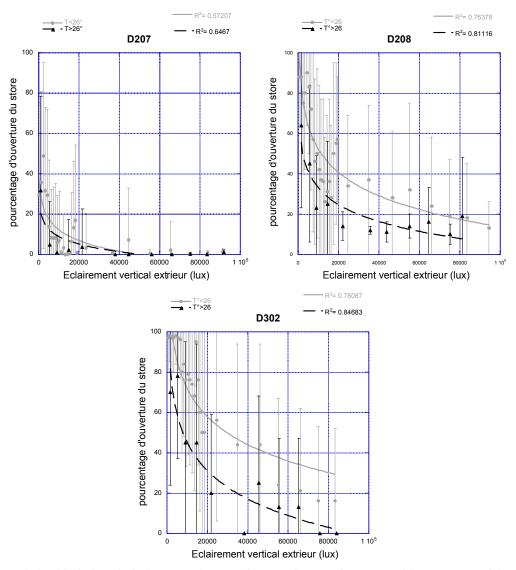
**Figure 3.16:** Variation de l'inclinaison des lames lorsque la température ambiante est supérieure ou inférieure à 26°C, mode 1.

On peut observer qu'en général l'hypothèse du décalage de seuil est confirmée (à part pour le bureau D303). En effet, si la température à l'intérieur du bureau est supérieure à 26°C, l'occultation de la baie est plus forte, autrement dit les lames sont davantage inclinées. On trouve, en moyennant tous les comportements individuels, que le décalage moyen d'inclinaison vaut 10°.

C'est-à-dire que lorsqu'il fait chaud, l'inclinaison des lames sera plus sévère de 10° que s'il faisait moins de 26°C.

Seul le sujet du bureau D303 semble ne pas adopter ce comportement. Un paramètre plus fort que la température ambiante guiderait-il l'utilisation de ses protections solaires?

Il est possible d'effectuer le même type d'analyse pour les trois sujets qui utilisent leurs stores vénitiens en mode 2. Sur la figure 3.17, on trace la variation de la hauteur du store vénitien de la grande fenêtre (store 2), en fonction de l'éclairement vertical extérieur lorsque la température ambiante est inférieure et supérieure à 26°C.



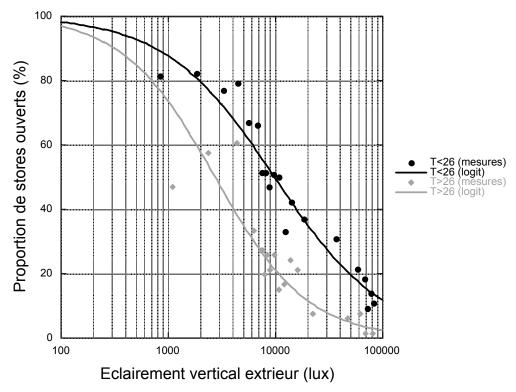
**Figure 3.17:** Variation de la hauteur du store lorsque la température ambiante est supérieure ou inférieure à 26°C, mode 2.

La tendance de décalage de seuil est également observée ici, hormis pour le bureau D207.

Si l'on effectue une moyenne du décalage de hauteur entre les moments où la température à l'intérieur du bureau excède 26°C et ceux où elle est inférieure, on trouve un décalage de 15 %.

Ce qui veut dire que lorsqu'il fait chaud (plus de 26°) à l'intérieur du bureau, le store couvrira en moyenne 15 % de surface de la baie en plus.

On peut également traiter les données des individus utilisant leurs stores en mode 2 à l'aide de la méthode du Logit. On peut lire sur la figure 3.18, la proportion de stores ouverts en fonction du logarithme de l'éclairement, pour les deux plages de températures considérées.



**Figure 3.18:** Proportion de stores ouverts lorsque la température ambiante à l'intérieur du bureau est supérieure ou inférieure à 26°C, mode 2.

Les valeurs de la proportion P de stores ouverts sont données par:

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = 7.9791 - 1.999 \times \log(E_{vertext}), \ R^2 = 0.9225, \ température inférieure à 26°C.$$
 (éq 3.10) 
$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = 8.1785 - 2.3787 \times \log(E_{vertext}), \ R^2 = 0.8375, \ température supérieure à 26°C.$$
 (éq.3.11)

La loi ne semble pas être correlée avec les points d'expérience lorsque  $Log(E_{vertext})$  est inférieur à 3.8, ce qui correspond à environ 6300 lux, ceci pour la courbe correspondant aux températures supérieures à 26°C. Nous ne ferons donc pas de comparaison en-deçà de cette valeur.

En étudiant la courbe de la figure 3.16, on peut dire qu'entre 15 et 30 % des stores sont ouverts en plus lorsque la température à l'intérieur du bureau ne dépasse pas 26°C.

## III.6.8.2. Conclusion sur l'hypothèse 8.

D'après l'analyse de nos données, il semble que la température ambiante à l'intérieur du bureau ait un effet sur la façon dont un individu pilote sa protection solaire.

Nous avons observé que si la température à l'intérieur du bureau dépasse 26°C, les individus baissent davantage leurs stores vénitiens (de 15 %) et inclinent plus les lames (de 10°).

Cependant il nous est difficile de conclure que cela n'est qu'un effet de la température ambiante. Laurentin [Laurentin, 2001] a montré que la saison a davantage d'effet que la température sur les préférences lumineuses.

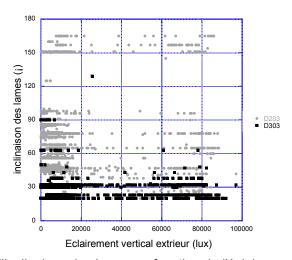
Nous avons observé que l'occurrence de températures supérieures à 26°C dans notre cas s'est essentiellement produite en été.

Par conséquent, il semble plus probable de conclure en disant que l'on assiste ici à un effet couplé de la température et de la saison.

# III.6.9. Hypothèse 9 (influence de la position de l'écran).

#### III.6.9.1. Résultats.

Nous allons voir ici l'effet qu'a la position de l'écran de visualisation sur l'utilisation de la protection solaire. Pour cela nous allons tout simplement comparer les données brutes (environ 1800 points pour chaque bureau) d'inclinaison des lames pour deux bureaux. Un bureau dans lequel l'écran est positionné perpendiculairement à la baie; où le sujet utilise ses stores en mode 1 sera comparé à un bureau où l'écran regarde la baie, c'est à dire que l'on peut voir le reflet de celle-ci sur l'écran de manière permanente, où les stores sont également utilisés en mode 1. Le bureau D203 correspond à la description du premier et nous étudierons le bureau D303 pour la seconde configuration (voir annexe 1 pour le détail des bureaux).



**Figure 3.19:** Variation de l'inclinaison des lames en fonction de l'éclairement vertical extérieur pour les bureaux D203 et D303.

L'observation du graphe de la figure 3.19 confirme immédiatement l'hypothèse. Même pour les faibles niveaux d'éclairement vertical extérieur (<20 klux), les lames du store du bureau D303 sont inclinées à moins de 40° en quasi-permanence, alors

que le sujet du bureau D203, dont l'écran est exempt du reflet de la baie, utilise l'inclinaison des lames sur une dynamique plus importante.

L'analyse nous montre que dans le bureau D303 les lames sont inclinées à moins de 40° durant 90 % du temps.

## III.6.9.2. Conclusion sur l'hypothèse 9.

Il était facilement envisageable que lorsque le reflet de la baie est présent sur l'écran, le besoin d'occulter celle-ci allait être plus sévère que toute configuration dont l'écran est exempt du reflet de la baie.

Ces résultats nous confirment une fois de plus, preuve à l'appui, que la position la plus adaptée pour un écran de visualisation est d'être perpendiculaire à la baie.

# III.7. Résumé et conclusions générales.

Durant trente semaines, nous avons collecté des informations relatives à l'utilisation des protection solaire. L'analyse de 1 336 560 données nous a permis d'aboutir à certaines conclusions.

S'il est difficile de dresser un comportement moyen, on observe une cohérence individuelle en ce qui concerne l'utilisation des stores.

Les trois quarts du temps, les individus règlent les protections solaires de manière à ce que la luminance de la baie reste inférieure à 1800 cd/m<sup>2</sup>.

En été, si la température ambiante à l'intérieur d'un bureau dépasse 26°C, la baie sera davantage occultée par les protections solaires

Une protection solaire motorisée est utilisée trois fois plus qu'une protection solaire contrôlée manuellement.

Les individus utilisent leurs stores vénitiens en position haute, basse avec lames à l'horizontale ou basse avec lames inclinées vers le sol extérieur (très rarement en position intermédiaire ou en position basse, lames inclinées vers le ciel).

Des stores vénitiens à lames trop sombres peuvent entraîner une surconsommation de l'éclairage artificiel.

La présence du reflet de la fenêtre sur l'écran entraîne une atténuation forte de la baie.

L'utilisateur attend que le niveau de lumière naturelle à l'intérieur de son bureau soit faible avant de remonter sa protection solaire.

Les luminances de voile sur écran de visualisation déduites des abaques de Blackwell sont trop restrictives pour des écrans de qualité standard à mauvaise.

La règle des rapports de luminance 1:3:10 ne s'applique pas dès lors qu'une source d'éclairage naturel est présente dans le champ de vision. Dans ce cas, on préférera conseiller de maintenir des rapports dans un ordre de 1:6:20.

Le Glare Index ne semble pas adapté pour caractériser l'éblouissement en éclairage naturel.

Nous avons obtenu ici des informations sur le comportement des usagers face à l'utilisation de leurs stores vénitiens qui permettent d'une part d'adapter le modèle développé dans le chapitre 2, et d'autre part de mettre en évidence des comportements à partir de mesures sur le long terme.

La suite de ce travail va à présent consister à coupler les informations des chapitres 2 et 3 pour pouvoir proposer un modèle d'utilisation de stores vénitiens dont les critères de commande auront été ajustés à partir de mesures sur le terrain. Ces critères sont par défaut réglés en fonction du comportement moyen du panel étudié, mais il est bien sur possible, et même souhaitable, que chacun puisse les adapter à son propre comportement lumineux.

Par conséquent, nous serons amenés à comparer les résultats fournis par notre modèle de pilotage simplifié de stores vénitiens avec la façon dont les huit sujets de notre étude pilotent réellement leur store vénitien, dans la mesure du possible.

Pour conclure nous envisagerons un aspect plus visuel. A l'aide de données météo statistiques sur le climat lumineux fournies par satel-light [Dumortier, 2002], nous allons répondre à une question concernant l'utilisation d'un store vénitien à travers l'Europe : Quel est le nombre d'heures de confort apporté par un store vénitien?

# **Chapitre 4**

Amélioration du modèle théorique.

# IV.1.Adaptation du modèle analytique en fonction de l'analyse des résultats de la campagne de mesures.

Les enseignements tirés de la campagne de mesures sur site, détaillée dans le chapitre 3, nous permettent d'ajuster le modèle théorique présenté dans le chapitre 2.

Brièvement, notre modèle théorique développé dans le chapitre 2, proposait le scénario de commande suivant :

- Stores baissés en permanence
- Inclinaison des lames selon deux critères de performance visuelle : ne pas dépasser la luminance de voile déduite des abaques de Blackwell, et maintenir les rapports de luminances dans le champ de vision dans des proportions 1:3:10.
- Inclinaison des lames pour bloquer le rayonnement solaire direct.

Ce scénario est adapté à la configuration de chaque espace (position et luminance de l'écran, couleur des murs, couleur des lames du store).

D'après les résultats exposés dans le chapitre précédent, on peut proposer pour les écrans disposés perpendiculairement à la baie, ou lorsque la baie n'est pas présente dans le champ de vision et que la fenêtre ne se reflète pas sur l'écran, les modifications décrites ci-après. Ces modifications tiennent compte du comportement moyen du panel, aussi, on peut envisager que les critères soient modifiés

## IV.1.1. Seuil de déclenchement du store vers le bas.

Si les stores sont baissés en permanence pour certains, nous avons vu qu'il existe également des individus qui baissent leurs stores à partir d'un certain seuil d'éclairement extérieur ou dès lors que la luminance de la baie dépasse une certaine valeur. L'analyse des données nous permet d'exclure les positions intermédiaires car elles ne sont que très peu sélectionnées par les sujets de notre campagne de mesures (voir figure 3.7).

Ces seuils étant évidemment différents d'un individu à un autre, il est difficile de proposer un seuil de déclenchement universel. Cependant les analyses effectuées dans le cadre de l'hypothèse 6 nous montrent que pour les individus fonctionnant en mode 2 (stores relevés jusqu'à un certain seuil), il semble que lorsque l'éclairement sur la baie atteint 15 klux, la moitié des stores est baissée. D'autre part, pour la totalité du panel de sujets étudié, 85 % des stores sont baissés à cette valeur de 15 klux sur la baie.

Nous pensons donc qu'il est pertinent, s'il est question d'intégrer notre modèle à un automatisme de stores vénitiens, de demander à l'individu s'il souhaite garder son store baissé en permanence ou non. S'il ne le souhaite pas, le déclenchement vers le bas du store vénitien aura lieu dès que l'éclairement sur la baie atteindra 15 klux. Et s'il le souhaite, le store sera baissé en permanence.

On peut également imaginer que cette consigne de déclenchement du store vers le bas puisse être ajustée individuellement s'il elle ne convient pas à la personne concernée. Par défaut, elle sera réglée à 15 klux.

## IV.1.2. Inclinaison des lames.

Nous pouvons, d'après nos résultats (voir figure 3.7) exclure l'éventualité des inclinaisons des lames vers le ciel (angles supérieurs à 90°) de notre modélisation. Une fois le store baissé, les lames seront inclinées à moins de 90° (vers le sol extérieur) pour pouvoir remplir les trois critères rappelés ci-après.

# IV.1.2.1. Luminance de voile à ne pas dépasser sur l'écran.

Nous venons de voir que les sujets ne règlent pas tout à fait leur protection solaire de manière à ce que la luminance de voile sur leur écran de visualisation respecte les recommandations de Blackwell. Nous avons vu en effet que nous pouvons classer les écrans en trois classes de qualité, voir chapitre 3, paragraphe 1.1.1.

Pour chacune de ces classes, les résultats de l'hypothèse 1, nous permettent d'ajuster les critères de Blackwell préalablement implémentés dans le modèle. Les nouveaux critères sont présentés dans la table 4.1.

| Qualité de l'écran | Luminance de voile maximale (cd/r |  |  |  |
|--------------------|-----------------------------------|--|--|--|
| Mauvaise           | 5                                 |  |  |  |
| Standard           | 10                                |  |  |  |
| Bonne              | 20                                |  |  |  |

Table 4.1: Luminance de voile maximale en fonction de la qualité de l'écran.

# IV.1.2.2. Rapports de luminance dans le champ de vision.

Nous avons vu dans le cadre de l'hypothèse 2 (chapitre 3), que les recommandations liées aux rapports de luminances 1:3:10 dans le champ de vision semblent très restrictives dès lors qu'une source d'éclairage naturel couvre une surface relativement importante du champ de vision. En effet, si l'on peut parfois tolérer des rapports de luminances allant de 1 à 50 sur une petite surface du champ de vision (inférieure à 5 %), il semble qu'en moyenne, les luminances du champ de vision se situent plutôt dans des rapports 1:6:20.

On ajoutera cependant une tolérance supplémentaire lorsque l'écran est proche de la baie. Nous avons vu dans le cadre de l'hypothèse 6.2, que la luminance de la baie proche du sujet est inférieure à 1800 cd/m² durant 75 % du temps, en moyenne. Nous pouvons donc dire que si l'écran est situé à moins de 1.5 m de la baie (voir paragraphe I.1.7 du chapitre 1) on positionnera les lames du store vénitien de manière à maintenir la luminance de la baie en dessous de 1800 cd/m².

# IV.1.2.3. Blocage du rayonnement solaire direct.

L'algorithme de positionnement des lames en fonction de la position du soleil sera activé à partir d'une valeur d'éclairement sur la baie à partir de laquelle, statistiquement, il y a une forte probabilité que le rayonnement global contienne une partie directe.

Lorsque l'on analyse la répartition en fréquence des éclairements sur la façade concernée par notre étude, on observe des différences entre le matin et l'après midi. En effet, la façade étant orientée sud-est, le soleil direct, quand il y en a, frappe uniquement le matin. Par conséquent, les éclairements élevés, jusqu'à 100 klux, ont lieu le matin, et l'après midi, l'éclairement sur la façade ne dépasse pas 20 klux (voir également figure 3.8 chapitre 3).

On peut donc dire, concernant notre modélisation, que si l'éclairement vertical global mesuré sur la façade dépasse 20 klux, on pourra considérer qu'il y a du rayonnement solaire direct, et ainsi activer le module de blocage du rayonnement solaire direct intégré au modèle. Cette fonction est désactivée en dessous de 20 klux en façade.

# IV.1.3. Seuil de déclenchement du store vers le haut et inclinaison des lames pour plus de lumière.

Malgré le phénomène d'hystérésis observé dans le cadre de l'hypothèse 6.3, nous allons fixer le seuil de déclenchement vers le haut du store à la même valeur que celui auquel il est baissé.

En effet, il ne paraît pas aberrant de dire que si un tel phénomène d'hystérésis est observé, il est essentiellement dû au fait que les individus peuvent attendre d'être quasiment dans la pénombre avant d'agir sur leur store pour de bénéficier de plus de lumière naturelle, dans la mesure de la disponibilité extérieure. Cela ne reflète pas un choix volontaire de l'individu, mais plus le fait qu'il ne se rend pas nécessairement compte de la faiblesse de la lumière ambiante.

C'est pourquoi nous proposons donc de remonter le store à 15 klux par défaut, ou bien à la valeur qui aura été éventuellement souhaitée par l'individu concerné.

En ce qui concerne l'inclinaison des lames, elle se produira au même niveau d'éclairement lorsque celui-ci croit et décroît.

# IV.1.4. Cas des autres positions d'écran.

En ce qui concerne les positions d'écran labellisées ici 2 (l'écran regarde la baie) et 4 (l'écran tourne le dos à la baie) (voir figure 2.19, chapitre 2), les critères de commande du store vénitien seront différents.

Pour la position 2, en raison du reflet de la baie sur l'écran, les stores seront baissés en permanence et les lames seront inclinées selon les critères identiques au cas où l'écran est perpendiculaire à la baie. Mais les lames seront très vite inclinées au maximum étant donné que le reflet sur l'écran atteint rapidement les seuils de luminance de voile que nous avons évogués plus haut.

Pour la position 4, le store ne sera pas baissé à 15 klux en façade mais à 8000 lux. En effet, à ce niveau, le rayonnement solaire direct est absent, on peut donc écrire, si

le facteur de transmission du vitrage vaut 70 %, que l'éclairement vertical extérieur permettant à la luminance de la baie de rester inférieure à 1800 cd/m² vaut:

$$E_{vertext} = \frac{\pi \times 1800}{0.7} = 8000 lux$$
.

Et par la suite, les lames seront inclinées de manière à ce que la luminance de la baie reste inférieure à 1800 cd/m² (seuil de luminance de baie dépassé 25 % du temps en moyenne, voir hypothèse 6.2, chapitre 3)

# IV.2.Comparaison des données mesurées avec les résultats fournis par le modèle modifié.

Le meilleur moyen pour valider le modèle de pilotage de stores vénitiens que nous avons élaboré reste de mener une autre campagne de mesure similaire à celle qui a été présentée ici mais en automatisant les stores à l'aide de notre modèle. Ensuite, pour vérifier la bonne acceptation de celui-ci par les sujets, il suffirait de regarder le nombre d'actions correctives réalisées par chaque individu sur les positions données par l'automatisme.

Il n'est pas possible de valider un modèle à partir des données qui ont servi à le bâtir. Nous allons toutefois regarder la cohérence de notre modèle avec les données collectées au cours de quelques journées.

Nous avons sélectionné une journée au cours de la semaine qui est présentée dans le chapitre précédent sur la figure 3.8, ceci pour chacun des huit bureaux.

Nous avons préféré utiliser les données quotidiennes plutôt que celles moyennées présentées au paragraphe 6.6.1 du chapitre 3. En effet, d'une part, ce type de moyenne ne rend pas compte de la dynamique de la lumière naturelle au cours d'une journée, et d'autre part, il n'est pas possible de faire apparaître la variation de l'inclinaison des lames qui permet de bloquer le rayonnement solaire direct étant donné que ces graphiques moyens sont présentés en fonction de la valeur de l'éclairement sur la baie, quelle que soit la date.

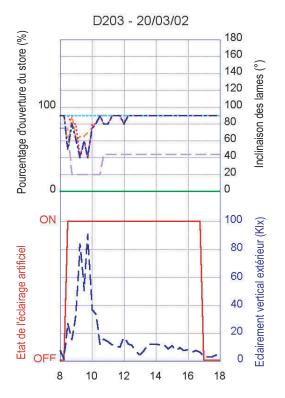
Sur les graphiques de la figure 4.1, on peut observer les variations de l'inclinaison des lames et de la hauteur du store vénitien pour une journée dans chaque bureau, d'une part, telles qu'elles ont été décidées par l'occupant et d'autre part, telles qu'elles sont calculées par le modèle modifié. En ce qui concerne l'inclinaison des lames donnée par le modèle, nous avons choisi de représenter séparément celle qui remplit chacun des trois critères de pilotages que nous avons retenus. Cette représentation permet de visualiser l'influence de chacun des critères sur l'inclinaison des lames au cours de la journée et ceux qui traduisent au mieux le comportement de chaque individu.

Sur la figure 4.1, on peut donc comparer les actions effectuées par l'individu avec celles données par le modèle pour:

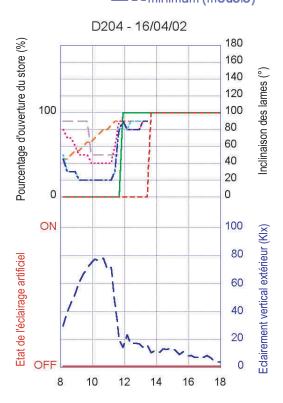
- 1/ Bloquer le rayonnement solaire direct
- 2/ Limiter la luminance de voile sur l'écran de visualisation.
- 3/ Limiter les rapports de luminance dans le champ de vision de l'individu.
- 4/ Remplir les trois critères précédents.

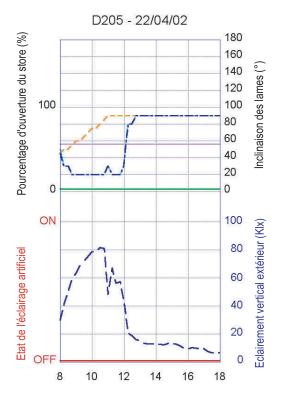
# Pourcentage d'ouverture du store (%)

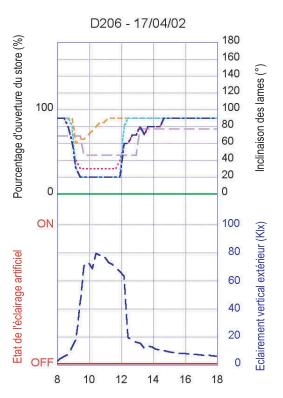
hauteur (mesure)
- - hauteur (modele)



## 







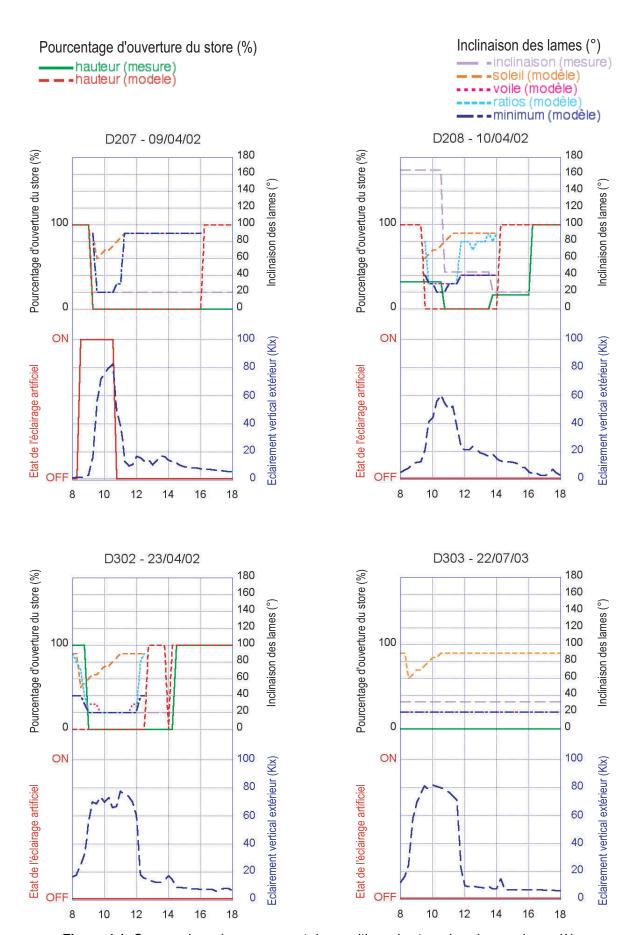


Figure 4.1: Comparaison des mesures et des positions du store données par le modèle.

Plusieurs observations peuvent être faites au regard de ces graphiques. Nous nous pencherons d'abord sur les comportements individuels avant de faire quelques remarques générales.

# IV.2.1. Comportement individuel.

Nous présentons ici uniquement les résultats du modèle sur une journée pour chaque bureau. Or même si le comportement de chaque sujet est relativement systématique, il serait utopique de penser que notre modèle pourra convenir à l'état d'esprit de chacun tous les jours. C'est pourquoi il faut garder en mémoire qu'un système de pilotage de store doit pouvoir être momentanément suspendu afin que l'individu puisse régler sa protection solaire comme il le souhaite, même si cela ne correspond pas au modèle de pilotage.

Si l'on compare bureau par bureau les résultats du modèle avec les mesures, on s'aperçoit qu'en général, les résultats sont relativement cohérents. Nous analysons ici les graphiques de la figure 4.1.

Pour le bureau D203, si l'uniformité des luminances dans le champ de vision peut être respectée en laissant les lames à l'horizontale, il faudra davantage occulter pour ne pas dépasser la luminance de voile maximale et bloquer le rayonnement solaire direct. Il semble que ce sujet occulte plus que nécessaire. En effet, si les lames placées à l'horizontale à partir de midi garantissent de bonnes conditions de confort, selon le modèle, le sujet préfère occulter davantage (à 40°) et allumer l'éclairage artificiel. On s'aperçoit bien sur ce genre de cas précis quel peut être le rôle d'un système de pilotage de protections solaires. Il s'agit d'une part de supprimer au mieux les situations éblouissantes, mais aussi de donner plus de lumière naturelle à un individu lorsque celui-ci ne sait pas qu'il peut en avoir plus, étant donné qu'il ne voit pas ce qu'il se passe à l'extérieur si ses stores sont fermés et que son éclairage artificiel est allumé.

Pour le bureau D204, cette journée nous montre que le modèle semble occulter plus que le sujet ne le souhaite en réalité. Si le critère d'uniformité des luminances semble ici trop sévère, l'occultation pour ne pas dépasser la luminance de voile semblerait mieux convenir, même si encore un peu restrictive. Ce sujet étant le plus photophile du panel, il n'est pas surprenant de voir que le modèle serait pour lui trop occultant. Pour ce type de sujet, on pourrait essayer de décaler les seuils du modèle.

Pour le sujet D205, la comparaison est rapide. Le store n'est pas du tout bougé durant cette journée, ce qui est souvent le cas dans ce bureau. Il est donc difficile de savoir si le modèle conviendrait à ce sujet précis.

Toutefois, il faut garder en mémoire que ce bureau n'est occupé qu'entre 8 et 14 heures. Cela peut expliquer le fait que le store n'est pas remonté étant donné que les situations à faible disponibilité de lumière naturelle se produisent l'après-midi.

Le sujet du bureau D206 est celui qui a présenté le comportement le plus systématique et reproductible. L'évolution de l'inclinaison des lames choisie par le

sujet et de celle donnée par le modèle sont relativement similaires. Cependant, le modèle semble être peu plus sévère que les choix de cet individu.

Le fait que ce sujet ait un comportement relativement systématique laisse penser qu'il devrait bien accepter notre système de pilotage des stores vénitiens.

On s'aperçoit sur la journée étudiée dans le bureau D207, que le modèle suit bien le comportement du sujet le matin, en revanche il propose davantage de lumière l'après-midi. En effet, alors que le sujet laisse les lames du stores inclinées au maximum, le modèle propose toutefois de les placer à l'horizontale pour profiter au maximum de la lumière naturelle tout en maintenant de bonnes conditions de confort visuel.

Le cas du bureau D208 est particulier. C'est quasiment le seul sujet qui inclinait les lames du store vers le ciel (inclinaison supérieure à 90°), et plaçait les stores à des hauteurs intermédiaires. Le modèle agit sur les stores en tout ou rien et en inclinant les lames vers le sol, il est donc difficile de le comparer aux mesures dans ce cas. Nous ne pouvons par conséquent pas dire si les positions proposées par le modèle conviendraient à ce sujet sur cette journée précise. Le seul moyen de le savoir serait de tester le modèle sur ce sujet afin de voir sa réaction.

Le modèle semble bien prédire le comportement du sujet du bureau D302 sur cette journée précise. Il a en effet un mode de fonctionnement assez radical. Les stores sont soit totalement remontés, soit baissés et les lames inclinées à 20°. Le store vénitien n'est ici utilisé que selon deux positions, et ce comportement est systématique chez ce sujet.

Le sujet du bureau D303 garde ses stores fortement inclinés en permanence à cause de la position de son écran. La fenêtre se reflète en permanence sur celui-ci empéchant une bonne lisibilité, ainsi, le seul moyen de pallier cette gêne est de fermer le store au maximum. Le modèle est fidèle à cette tendance et traduit bien le comportement de ce sujet.

# IV.2.2. Comportement général.

Plusieurs remarques d'ordre général sont à faire cependant sur les points à améliorer.

On peut tout d'abord observer que l'inclinaison des lames visant à bloquer le soleil direct ne semble pas suffisante pour garantir les confort visuel. En effet, la forme en dent de scie est due au fait que le soleil est bas le matin, donc l'inclinaison doit être maximale pour l'empêcher de pénétrer dans le local et au fur et à mesure de la matinée, le soleil monte dans le ciel, autorisant des inclinaisons de lames de moins en moins sévères. Toutefois, on observe que l'éclairement global sur la baie peut augmenter même si l'inclinaison des lames pour bloquer le rayonnement direct à tendance à aller vers la position horizontale. On peut donc penser qu'il n'est pas suffisant de bloquer le rayonnement solaire direct pour garantir de bonnes conditions de confort et performance visuelle.

D'autre part, on s'aperçoit que lorsque les fluctuations de lumière naturelle sont importantes, le modèle suit la même tendance. Cet aspect est visible sur la figure 4.1 dans le cas du bureau D203. Le passage d'un nuage épais entraîne l'ouverture des stores. Cependant, ce phénomène est de courte durée, par conséquent l'automatisme de pilotage va de nouveau incliner les lames du store plus fort dès le nuage passé. Ce genre de fluctuations peut être très mal perçu par un individu et peut entraîner une perte de concentration et un agacement certain. C'est pourquoi il faut trouver une solution pour éviter les mouvements incessants du store lors de journées où le ciel est couvert avec de nombreuses éclaircies. Comme on ne peut pas prédire la quantité de lumière naturelle qui sera disponible quinze minutes après, le meilleur moyen semble être de proposer une temporisation avant que l'automatisme n'agisse sur le store, afin d'estimer si la fluctuation lumineuse éventuelle est ou non passagère.

On peut lire dans les travaux de Velds [Velds, 1999] que dès lors que la luminance de la baie dépasse 1800 cd/m² (seuil que nous avons implémenté dans le modèle) et reste inférieure à 3500 cd/m², un individu actionnera sa protection solaire dans un intervalle de 30 à 60 minutes. On peut donc suggérer que le store vénitien soit actionné par l'automatisme toutes les trente minutes si nécessaire.

La question reste de savoir quel sera la valeur de l'éclairement vertical extérieur qui servira de consigne à l'automatisme. S'il prend en compte la valeur instantanée de l'éclairement vertical extérieur, le problème des intempéries passagères ne sera en aucun cas résolu. Par conséquent, nous proposons de piloter la protection solaire à un instant t non pas avec la valeur de l'éclairement vertical extérieur à cet instant t, mais avec la valeur moyenne calculée à l'aide des valeurs des éclairements mesurées toutes les cinq minutes durant la demie-heure précédant l'instant t. Ce procédé pourra permettre de relativiser les effets des intempéries, comme une brève éclaircie ou un court passage nuageux.

On peut également observer que le modèle semble parfois trop sévère en ce qui concerne l'inclinaison des lames. En effet, les sujets n'inclinent que rarement leurs stores au maximum (20°), or l'automatisme sélectionne souvent cette position. Il serait intéressant de voir si en fixant le maximum d'inclinaison à 30 ou 40°, les sujets seraient suffisamment protégés des forts niveaux de lumière naturelle. Ce seuil ne serait par conséquent pas applicable dans le cas où une inclinaison plus forte est nécessaire pour bloquer le rayonnement solaire direct comme c'est parfois le cas en début de matinée.

Au final, on s'aperçoit qu'il est difficile de proposer un modèle universel qui conviendrait à chacun. Cependant, le modèle que nous proposons ici est ajustable. Les seuils de déclenchement du store peuvent être modifiés afin de satisfaire au mieux chacun. Qu'il s'agisse de la luminance de voile sur l'écran ou de la luminance maximale de la baie, nous avons fixé les seuils à partir des mesures effectuées sur le terrain. Mais des différences entre les sujets ont été observées. Par exemple en ce qui concerne la luminance maximale de baie, nous avons enregistré des rapports pouvant aller de 1 à 5 entre certains sujets. Si un individu ne tolèrera pas une

luminance de baie supérieure à 1000 cd/m², un autre pourra supporter jusqu'à 5000 cd/m².

Concrètement, s'il s'agit de mettre en pratique notre modèle afin de piloter les stores vénitiens d'une façade, il faut tout d'abord équiper le bâtiment d'un réseau similaire à celui que nous avons utilisé. La façade devra idéalement être équipée de deux cellules d'éclairement, la première mesurant l'éclairement vertical global et la seconde le diffus. L'éclairement diffus permettant de calculer la valeur de la lumière réfléchie à l'intérieur de chaque bureau.

On pourra également équiper chaque bureau d'une sonde de température afin de tenir compte des besoins d'occultation différents lorsque la température devient élevée, mis en évidence dans ce travail.

La configuration de chaque bureau devra être renseignée au PC de commande, soit directement, soit à l'aide d'un boîtier de commande dont chaque bureau serait équipé. Dans cet interface, il faudrait que chaque occupant de bureau puisse entrer les caractéristiques de son bureau et de son écran, telles qu'elles sont nécessaire au fonctionnement du modèle.

Ou mieux encore, on peut imaginer que le PC de chaque occupant de bureau soit équipé d'une application qui dialogue avec le PC qui centralise la commande des stores, ou même que chaque PC commande lui-même le store de son bureau. Cette application permettrait de pouvoir entrer les paramètres du local au moyen d'une interface facile d'utilisation pour chaque individu.

# IV.2.3. Apport lumineux.

Si cet automatisme garanti l'absence d'inconfort visuel tout au long de la journée, il permet également, dans certains cas, un gain de lumière naturelle considérable. On peut facilement calculer le gain (ou la perte) total de flux lumineux apporté par l'automatisme sur une période définie. On peut l'estimer en connaissant les valeurs du facteur de transmission hémisphérique-hémisphérique du store noir en fonction de l'inclinaison des lames, que les positions du store données par le sujet au cours de la journée et celles données par l'automatisme (voir figure 4.1, bureau D207) ainsi que les valeurs d'éclairement aux mêmes instants.

Le but est donc finalement de comparer le flux lumineux entrant au total au cours de cette journée, d'une part d'après les réglages de l'utilisateur et d'autre part d'après les positions du store données par le modèle de pilotage. Ce rapport de flux, sur toute la journée (valeurs toutes les quinze minutes), est donné par :

$$\frac{F_{\text{modèle}}}{F_{\text{manuel}}} = \frac{\sum_{\text{journée}} \tau_{\text{baie} (\text{mod èle})} \times E_{\text{vertext}} \times S_{\text{v}} \times \Delta t}{\sum_{\text{journée}} \tau_{\text{baie} (\text{manuel})} \times E_{\text{vertext}} \times S_{\text{v}} \times \Delta t} \quad \text{(éq. 4.1)}.$$

 $\tau_{\text{baie}}$  est le facteur de transmission de la baie, donné par l'équation 3.8 (chapitre 3) en ne considérant qu'une seule fenêtre.

S<sub>v</sub> est la surface vitrée Δt est l'intervalle de temps, ici 15 minutes.

Si l'on effectue des rapports pour les huit journées présentées sur la figure 4.1, on aboutit, bureau par bureau, aux valeurs données dans le tableau 4.2.

| Bureau  | D203 | D204 | D205 | D206 | D207 | D208 | D302 | D303 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Rapport | 2.28 | 0.5  | 0.59 | 0.57 | 3.75 | 1.08 | 1.09 | 0.38 |

**Table 4.2:** Rapports entre le flux lumineux apporté par le modèle et le réglage manuel de l'utilisateur au cours d'une journée.

On constate que l'apport de lumière naturelle dû à l'automatisme n'est pas toujours notable. Pour les bureaux D203 et D207, le gain est évident. Pour les bureaux D208 et D302, la quantité de flux lumineux entrant dans les deux cas est quasi identique. Et pour les quatre autres bureaux, l'automatisme apporte moins de lumière que le réglage manuel des sujets.

Si ces comparaisons effectuées sur une journée ne sont pas forcément représentatives du comportement moyen, elles mettent en évidence le fait que le modèle peut parfois être trop sévère. Nous avons justement évoqué plus haut la possibilité de modifier les seuils de déclenchement du store implémentés à l'automatisme.

La marge d'amélioration de notre automatisme se situe plutôt, au regard des graphiques de la figure 4.1, au niveau de la partie occultation que de la partie apport de lumière naturelle. En effet, dans la majorité des cas, l'automatisme donne au sujet davantage de lumière naturelle que celui-ci n'en aurait eu avec ses réglages manuels dans les situations à faible disponibilité de lumière naturelle. En revanche, il semble que notre modèle soit en général trop sévère en ce qui concerne l'utilisation du store vénitien pour bloquer la pénétration de la lumière naturelle. Et c'est cette différence qui engendre les rapports présentés dans la table 4.2.

Ainsi, comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe précédent, on pourrait essayer de caler le minimum d'inclinaison à 40°, quand la configuration le permet (sauf le cas ou la fenêtre se reflète sur l'écran). Cela pourrait en plus offrir au sujet une vue vers l'extérieur que n'offre pas l'inclinaison à 20°. On privilégiera ici l'aspect contact visuel vers l'extérieur par rapport à la luminance de la baie, en invoquant la notion de tolérance à l'éblouissement dû à la lumière naturelle.

# IV.3. Utilisation d'une protection solaire à travers l'Europe.

Nous allons envisager, pour conclure, un aspect plus climatique. Nous allons essayer de quantifier selon nos critères de pilotage, le gain de confort visuel apporté par une protection solaire motorisée.

D'après nos seuils de déclenchement, on a estimé que les stores doivent être baissés dès lors que l'éclairement global sur la baie dépasse 15 klux. Ainsi, il suffit d'évaluer la fréquence de dépassement de ce seuil d'éclairement pour savoir la durée d'utilisation de la protection solaire.

On imagine que l'on déplace le bâtiment où nous avons effectué notre campagne de mesure partout à travers l'Europe afin de savoir quelles seront les durées d'utilisation de la protection solaire en fonction du climat. L'outil que nous allons utiliser ici est le serveur internet Satel-Light [Dumortier, 2002] (<a href="http://www.satel-light.com">http://www.satel-light.com</a>). Ce serveur fourni, entre autres, des cartographies de disponibilité de lumière naturelle élaborées à l'aide d'images prises toutes les trente minutes par le satellite Metetosat. Cette base de données est déduite de l'analyse statistique des images fournies par le satellite durant cinq années (de 1996 à 2000).

L'idée est de générer, dans un premier temps, une cartographie montrant la fréquence à laquelle un éclairement vertical global de 15 klux (seuil de déclenchement du store) est dépassé sur une façade Sud-Est à travers l'Europe entre 8 et 18 heures. Cependant, le site produit ces cartes tous les 2 klux, nous avons donc choisi 14 klux, plutôt que 16 klux.

Cette carte correspond également à la fréquence d'inconfort subie par les occupants si le bâtiment considéré n'était pas équipé de protections solaires. Ou encore, après modification de la légende, on peut lire le nombre d'heures de confort visuel apportées par une protection solaire motorisée, voir figure 4.2.

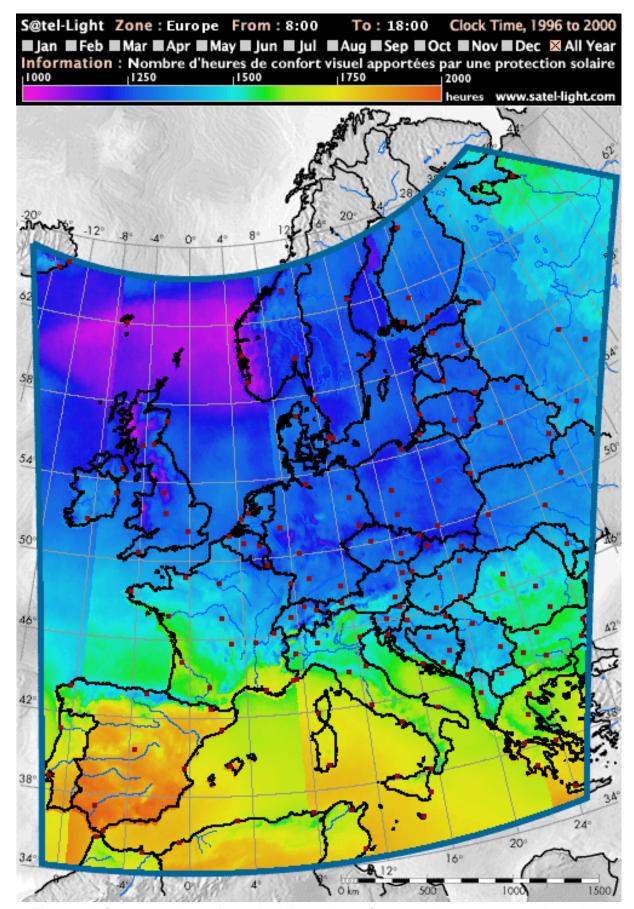


Figure 4.2: Carte européenne du nombre d'heure de confort apportées par une protection solaire.

Sur la carte de la figure 4.2, on peut juger de l'importance d'une protection solaire. En effet, elle permet de gagner jusqu'à 2000 heures de confort visuel sur une année passée dans un bâtiment orienté Sud-Est. On considère que le bureau est occupé entre 8 et 18 heures durant un total de 250 jours ouvrés, soit un total de 2500 heures.

C'est en Espagne, à l'exception de sa côte atlantique, que la protection solaire est la plus utile. Elle contribue au confort visuel de l'individu durant 2000 heures sur les 2500 heures de travail annuelles. Autrement dit, sans protection solaire, l'occupant de bureau aurait à supporter 2000 heures d'inconfort visuel. Durant les 500 heures restantes la protection solaire n'est pas nécessaire.

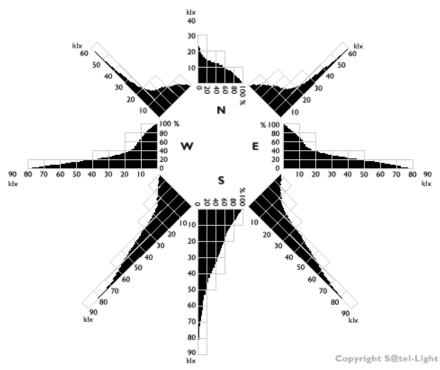
En France, la protection solaire permet d'apporter entre 1400 (Nord) et 1700 (Sud) heures de confort visuel.

Cette durée est d'environ 1500 heures par an en Roumanie, Bulgarie ou encore au Nord Ouest de la Russie.

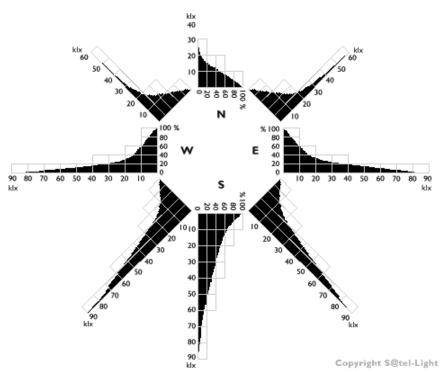
C'est sur la cote ouest de la Norvège et de l'Ecosse que la durée de gêne sera la plus faible. Mais même dans cette zone de l'Europe qui est la moins riche en lumière naturelle, sur 2500 heures de travail annuel, l'occupant de bureau qui ne dispose pas de protections solaires aura à subir une gêne due à la lumière naturelle, donc une baisse de ses performances visuelles, durant 1000 heures. Compte tenu du coût de la masse salariale, il est aisé de comprendre l'enjeu de la protection solaire.

D'autre part, si la protection solaire est équipée d'un automatisme comme celui développé ici, qui garanti une absence d'inconfort visuel, c'est donc autant d'heures d'efficacité au travail de gagnées.

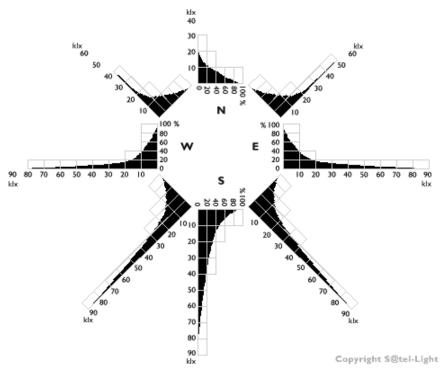
On peut également avoir ce type d'information sur un seul site, selon toutes les directions. Satel-Light propose de visualiser les fréquences cumulées de dépassement d'éclairements globaux verticaux selon huit directions sur le même graphique, pour un site précis. Sur les figures 4.3, 4.4 et 4.5 on peut voir les moyennes annuelles pour les sites d'Athènes, Lyon et Bergen.



**Figure 4.3**: Fréquence cumulée annuelle de dépassement d'éclairement globaux verticaux à Athènes (37°58′ N, 23°43′ E).



**Figure 4.4**: Fréquence cumulée annuelle de dépassement d'éclairement globaux verticaux à Lyon (45°45′ N, 4°51′E).



**Figure 4.5**: Fréquence cumulée annuelle de dépassement d'éclairement globaux verticaux à Bergen (60°23' N; 5°19' E).

Dans l'annexe 4, on donne ce type de fréquence cumulée pour tous les mois de l'année.

Ainsi en adoptant la même démarche que pour la carte précédente, on peut évaluer, quelle que soit l'orientation, le nombre d'heures d'inconfort subies par un individu, en considérant que la protection solaire doit être baissée à partir de 15 klux en façade. On peut comparer l'influence de l'orientation, et la différence entre le Nord et le Sud, par exemple. La table 4.2 indique le nombre d'heures d'inconfort subies en cas d'absence de protection solaire au Nord et au Sud sur les trois sites sélectionnés, à l'année et au mois de Juillet, ce qui équivaut au nombre d'heures de confort visuel apportées par la présence d'une protection solaire motorisée.

|   |         | Athènes  |      | Lyon |      | Bergen |      |
|---|---------|----------|------|------|------|--------|------|
| _ |         | Nord Sud |      | Nord | Sud  | Nord   | Sud  |
|   | Année   | 500      | 1500 | 500  | 1400 | 250    | 1000 |
|   | Juillet | 500      | 1750 | 1250 | 1650 | 500    | 1250 |

**Table 4.2:** Nombre d'heures de confort apportées par une protection solaire.

On peut vérifier ici l'argument de Fontoynont [Fontoynont, 2000], avancé en introduction de ce travail (voir paragraphe I.1.1), qui annonçait qu'une protection solaire permet d'améliorer les conditions de travail dans les bureaux pendant au moins 1000 heures par an. C'est effectivement le cas des façades orientées Sud, dans cet exemple. Cela est également vérifié pour les façades orientées Est et Ouest pour Lyon et Athènes.

## IV.4. Conclusions et perspectives.

Nous avons montré dans un premier temps la cohérence de notre modèle avec le comportement des sujets que nous avons suivis pendant huit mois.

Finalement, le meilleur moyen de proposer un modèle de pilotage de stores vénitiens qui semble suivre le comportement réel des individus reste d'analyser la façon dont ils utilisent leur protection solaire. On aurait pu penser au départ de ce travail, que la clé d'un bon modèle de pilotage de stores vénitiens réside dans la connaissance précise de la façon dont la lumière est transmise par un tel système de protection solaire complexe à modéliser. Nous voyons ici que la façon empirique dont nous avons approché l'aspect photométrique des stores vénitiens, malgré des erreurs de l'ordre de 30 à 40 %, permet tout de même d'obtenir un modèle de pilotage des stores vénitiens qui semble cohérent.

A présent, le meilleur moyen de vérifier l'acceptation de ce modèle de pilotage reste de le soumettre à un panel de sujets, de la même façon qu'a été menée notre campagne de mesures. Il sera ainsi possible de relever le nombre de corrections apportées par les sujets aux décisions prises par l'automatisme. Sans oublier qu'une bonne compréhension de la façon dont les sujets vivent avec leur automatisme passe également par le dialogue avec ceux-ci.

Toutefois, il est clair que l'on ne peut pas dire que ce modèle est universel, car des disparités de comportement, que nous avons mis en évidence ici, font qu'il n'est pas raisonnable d'envisager une telle généralisation. C'est pourquoi, il faut garder en mémoire que tout automatisme doit pouvoir à tout moment être désactivé par un individu afin que celui-ci puisse prendre la main sur le système. Reinhart [Reinhart, 2001] a observé que 45 % des actions d'un automatisme de pilotage de protections solaires (basé uniquement sur une consigne d'éclairement vertical) étaient corrigées par les utilisateurs. On peut penser que notre automatisme sera mieux accepté par les occupants de bureau, car il prend en compte plusieurs paramètres et critères de confort visuel. Seule une validation sur le terrain pourra permettre de répondre à cette question.

A l'avenir, on peut imaginer que si notre modèle de pilotage de stores vénitiens doit être utilisé sur le terrain, il pourra être adapté et amélioré. Le travail réalisé ici est une première approche du problème complexe qu'est le pilotage des protections solaires.

Pour faciliter l'utilisation de l'automatisme et prendre en compte les différents comportements mis en évidence ici, il pourrait être intéressant de tester un nouveau système de télécommande de pilotage des stores vénitiens.

Hormis les fonctions classiques d'inclinaison des lames, on pourrait trouver sur cette nouvelle télécommande des boutons permettant de passer en mode automatique. On peut penser que si cette télécommande propose trois systèmes de gestion des stores vénitiens, une plus grande partie des usagers serait satisfaite.

Ces trois modes de fonctionnement pourrait être par exemple:

1/ Priorité forte au travail sur écran. L'inclinaison des lames se fait selon les critères de confort visuel du modèle, c'est à dire en utilisant les réglages du modèle en l'état actuel, avec un minimum d'inclinaison des lames à 20°.

2/ Priorité modérée au travail sur écran, avec contact vers l'extérieur. L'inclinaison des lames se fait comme pour le mode 1, mais avec un minimum d'inclinaison des lames à 40°.

3/ Priorité totale à la vue et au contact vers l'extérieur. Ce mode de pilotage est destiné aux usagers qui ont un comportement photophile, comme c'était le cas du sujet du bureau D204 dans notre panel. Pour mieux satisfaire ce type d'usagers, une idée serait de régler la position des lames selon un décalage de 20° d'inclinaison en ouverture par rapport au modèle. En effet, si l'on regarde le cas du bureau D204 sur la figure 4.1, on s'aperçoit qu'en effectuant une translation vers le haut du réglage selon le modèle, on sera plus proche du comportement du sujet. Donc si l'on a fixé un minimum de 40° d'inclinaison de lames pour le mode de pilotage précédent (priorit modérée au travail sur écran avec contact vers l'extérieur), cela signifie que dans ce cas, le minimum d'inclinaison ne serait que de 60°, sauf si le rayonnement solaire direct requiert une inclinaison plus forte. Cela ne paraît pas aberrant si l'on regarde les valeurs moyennes de l'inclinaison des lames pour le bureau D204 notamment sur la figure 3.9 du chapitre 3. On se rend compte que, en moyenne, les lames ne sont pas inclinées à moins de 60°.

L'écran de visualisation est un des éléments clé de la prise de décision d'actionner la protection solaire. Ainsi, les écrans "nouvelle génération" équipés de sonde qui mesure la luminance de voile réglant ainsi la luminance du fond en fonction, peuvent très bien être couplés au système de pilotage des protections solaires en leur fournissant une consigne de déclenchement.

On peut également penser que l'avenir de l'automatisme de la protection solaire réside dans des systèmes auto-apprenants [Guillemin, 2001]. Un système qui, basé sur des notions de logique floue et de réseaux de neurones, apprendrait la façon dont un individu règle sa protection solaire selon divers paramètres et tenterait, après une période d'apprentissage, de restituer fidèlement le comportement supposé de l'occupant du bureau.

## Conclusion générale et perspectives.

La modélisation de l'utilisation des protections solaires par des individus travaillant sur écran de visualisation nécessite un suivi comportemental sur le long terme. Nous avons cherché ici à mettre en évidence les paramètres qui amènent cette population à actionner leurs protections solaires.

Nous avons pu montrer l'influence, sur l'utilisation d'un store vénitien, de certains paramètres tels que la luminance de la baie, la qualité de l'écran de visualisation ou la température ambiante dans le bureau, par exemple.

Il ressort de nos analyses qu'il est difficile de proposer une modélisation universelle permettant de prédire la façon dont un individu utilisera sa protection solaire, car l'usage de chacun en est différent. C'est pourquoi il est nécessaire qu'un automatisme de pilotage de stores vénitiens puisse offrir une certaine flexibilité, à savoir différents degrés de contrôle de la lumière naturelle. Aussi, même si nous avons observé que les comportements diffèrent d'un sujet à l'autre, il existe une cohérence individuelle mise en évidence par notre campagne de mesures sur le long terme.

Le modèle de pilotage de stores vénitiens développé ici permet d'une part de garantir des conditions de confort visuel permanentes à un occupant de bureau mais également de lui offrir un maximum de lumière naturelle. En effet, le rôle d'un automatisme de protection solaire ne se limite pas à occulter la lumière naturelle lorsque celle-ci devient génante, mais également, et c'est peut-être finalement un des intérêts majeurs de l'automatisme développé ici, de pouvoir redonner à l'individu un maximum de lumière naturelle lorsque celui-ci peut en manquer à cause d'une occultation trop forte du store vénitien.

L'automatisme de stores vénitiens développé ici, même s'il est perfectible, constitue une avancée par rapport aux systèmes existants car il intègre des exigences visuelles et des considérations comportementales. Certaines parties du modèle peuvent être améliorées, notamment la partie photométrique concernant la fonction de transfert lumineux du store vénitien.

Une étape à présent nécessaire, comme après l'élaboration de tout modèle, consisterait à mener une campagne de validation à grande échelle pour des sites et orientations variées. En effet, à la manière de la campagne de mesures que nous avons conduite ici, nous pouvons proposer aux usagers les scénarii de pilotage des stores vénitiens basés sur notre modèle afin de recueillir leurs impressions et d'évaluer leur satisfaction. Finalement, le meilleur indicateur de cette satisfaction se reflètera dans le nombre d'actions correctives effectuées sur les réglages proposés par le modèle.

On pourra également proposer un système permettant de mesurer précisément la luminance de la baie afin d'éviter les approximations faites ici en calculant la luminance de la baie à l'aide de la valeur de l'éclairement vertical extérieur et du facteur de transmission hémisphérque-hémisphérque du store vénitien.

L'avenir des systèmes de pilotage de stores vénitiens réside peut-être dans des systèmes "auto-apprenants" capable de reproduire le comportement d'un individu

après une période d'apprentissage. Plus cette période est longue, plus le modèle correspondra au comportement de l'usager. Ce type d'automatismes peut être réalisé à l'aide d'algorithmes génétiques et de notions de logique floue. Toutefois, même si ce type de système semble idéal, hormis le coût qu'il représente, il faut comprendre que le travail de suivi comportemental que nous avons réalisé ici représente une étape nécessaire, et qu'il ne peut être en aucun cas remplacé par des algorithmes génétiques. Ceux-ci devraient en effet pouvoir se baser sur des critères de déclenchement de store préalablement établis afin de rester dans une certaine zone de cohérence.

Enfin, un des points importants mis en évidence par notre travail est l'influence de la qualité de l'écran sur la façon dont un individu utilise sa protection solaire. Les théories de luminance de voile maximale acceptable sur l'écran basées sur les travaux de Blackwell, ont servi de point de départ à notre travail. Même si nous proposons des modifications à cette approche, le principe reste pertinent. Cela renforce l'idée que lorsqu'il s'agit de contrôler l'ambiance lumineuse dans un espace, il est important de s'intéresser à la tâche effectuée par l'individu pour qui l'automatisme va fonctionner, car les exigences visuelles sont différentes.

Ainsi, on peut imaginer que les nouvelles technologies d'écrans à luminances élevées pourront permettre d'adapter la luminance de l'écran en fonction de la lumière naturelle disponible. Cette évolution impose une adaptation notamment en conditions sombres ou nocturnes, pour ne pas travailler sur un écran trop lumineux afin de respecter une certaine uniformité des luminances. Ces nouvelles technologies d'écran apporteront également plus de souplesse dans le réglage des protections solaires, permettant aux individus de bénéficier au mieux de la lumière naturelle.

# Références bibliographiques

### **Chapitre 1**

AFE. Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail. Paris : Société d'éditions LUX, 1993, 88 p.

AFE. *Eclairage et travail sur écrans de visualisation*. 2ème édition. Paris : Société d'éditions Lux, 1997, 59 p.

AFNOR. Travail sur écran de visualisation et clavier (NF X 35-121). AFNOR, 1987.

AIE. Société d'Ergonomie de Langue Française [en ligne]. Disponible sur: <a href="http://www.ergonomie-self.org/">http://www.ergonomie-self.org/</a>. (11 décembre 2002).

ARVEV. Etude des facteurs de fatigue dans le travail sur écran de visualisation. Toulouse : Octarès Editions, 1992, 156 p.

BERRUTTO V. Métrologie de la qualité visuelle des ambiances lumineuses. Applications à l'éclairage des bureaux. Thèse de doctorat. Chambéry: Université de Savoie, 1996, 203 p.

BLACKWELL H. R. *Contrast threshold of the human eye.* Journal of the Optical Society of America, 1946, vol. 36, n°11, pp. 624-643.

BOUBEKRI M. and BOYER L. L. *Effect of window size and sunlight presence of glare*. Lighting, Research and Technology, 1991, vol. 24, n°2, pp. 69-74.

CHAUVEL P., COLLINS J. B. and DOGNIAUX R. *Evaluation de l'éblouissement du aux fenêtres, état de la question, 1ére partie.* Paris : Lux, 1983, n°121.

CIBSE. Code for interior lighting. London: CIBSE, 1994.

CIBSE. The visual environment for display screen use. London: CIBSE, 1996.

CIE. A unified framework of methods for evaluating visual performance aspects of lighting. CIE 19. Paris, 1972.

CIE. Vocabulaire International de l'Eclairage. Austria : CIE, 1987, 365 p.

DENIEUL P. *Eclairage et travail sur écrans de visualisation*. Journée Nationales de la Lumière, La Baule, France, 1986.

DUBOIS M. C. *Impact of shading devices on daylight quality in offices.* Thèse de doctorat. Lund: Lund University, 2001, 157 p.

FISK W. J. Health and productivity gains from better indoor environments and their relashionship with building energy efficiendy. Annual Review of Energy ans the Environment, 2000, vol. 25, pp. 537-566.

FONTOYNONT M. Lumière et bien-être. Lyon, France: Hexcel Fabrics, 2000.

HOPKINSON R. G. *The Ergonomics of Lighting*. London: Macdonald Technical and Scientific, c1970, 272 p.

IES. Code for interior lighting. London: IES, 1977.

INRS. Eclairage des locaux de travail. Aide mémoire juridique. Paris : INRS, 2000, 18 p.

ISO. Principles of ergonomics - The lighting of indoor work systems. (ISO 8995). 1989.

ISO. Ergonomic requirement for office work with visual display terminals (VDTs). Part 6: Guidance on the work environment., 1999.

IWATA T., SOMEKAWA N., TOKURA M., et al. *Subjective response on discomfort glare caused by windows.* Proc. of the CIE 22nd Session (Melbourne), 1991, pp. 108-109, 1991.

KANDAROUN R. Ergonomie et éclairagisme. Paris : LUX, 1986, vol. 141.

LEMOINE P. *La lumière et la dépression*. Colloque Lumière Santé Bien-être, Lyon, France, 2001.

LOE D. Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: experimental study. Lighting, Research and Technology, 1994, vol. 26, n°3, pp. 119-133.

MOON P. and SPENCER D. E. *The visual effect of non-uniform surrounds*. Journal of the Optical Society of America, 1945, vol. 35, n°3, pp. 233-248.

MOON P. and SPENCER D. E. Lighting Design. Addison-Wesley, 1948.

NEWSHAM G. R. and VEITCH J. A. *Lighting quality recommendations for VDT offices: a new method of derivation*. Lighting, Research and Technology, 2001, vol. 33, n°2, pp. 97-116.

OSTERHAUS W. *Brightness as a simple indicator for discomfort glare from large area glare sources.* 1st CIE Symposium on Lighting Quality, Ottawa, Canada, 1998, pp. 113-124.

PERDRIEL G. *Bienfaits et méfaits de la lumière sur notre santé.* Lyon: Hexcel Fabrics, 2000.

PIERSON J. *If sun shines in, workers work better, buyers buy more*. Wall Street Journal, 1995, 21st November 1995.

REA M. *Lighting Handbook, Reference & Application. 8th edition.* New York City: Illuminating Engineering Society of North America, 1993, 989 p.

SANTÉ (Institut Electricité Santé). La lumière qui soigne. Brochure technique. 2000.

SIVAK M. and FLANNAGAN M. *Discomfort glare is task dependent*. Proc. of the CIE 22nd Session (Melbourne), 1991, pp. 1-5.

VELDS M. Assesment of lighting quality in office rooms with daylighting systems. Delft, Germany: Technische Universiteit Delft, 1999, 209 p.

VIÉNOT F. Modélisation de la visibilité. Communication personnelle. Paris, 1998.

### Chapitre 2

AL-SHAREEF F. M., OLDHAM D. J. and CARTER D. J. A computer model for predicting the daylight performance of complex parallel shading systems. Building and environment, 2001, vol. 36, pp. 605-618.

BREITENBACH J., LART S., LANGLE I., et al. *Optical and thermal performance of glazing with integral venetian blinds. Energy and Buildings*, 2001, vol. 33, pp. 433-442.

CIE. Vocabulaire International de l'Eclairage. 1987, 365 p. (50(845).???

COURRET G., PAULE B. and SCARTEZZINI J.-L. *Gestion optimale des stores à lames orientables*. CISBAT 93, Lausanne, Suisse, 1993, pp. 333-338.

COUTELIER B. Caractérisation du confort visuel dans les lieux de travail grace à un dispositif expérimental de mesure de luminance. Rapport de DEA. Lyon: ENTPE, 2001, 77 p.

DUBOIS M. C. *Impact of shading devices on daylight quality in offices.* Thèse de doctorat. Lund: Lund University, 2001, 157 p.

DUMORTIER D. Mesure, analyse et modélisation du gisement lumineux. Application à l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments. Thèse de doctorat. Chambéry: Université de Savoie, 1995, 388 p.

DUMORTIER D. and VETRO P. Luminance Calibration of the Nikon Coolpix digital camera. LUX EUROPA 2001, Reykjavik, Iceland, 2001, pp. 341-345.

FONTOYNONT M. *Physique des ambiances, lumière et vision. Cours de 1ère année.* Vaulx-en-Velin: ENTPE, 1998.

INOUE T., KAWASE T., IBAMOTO T., et al. *The developement of an optimal control system for window shading deveices based on investigations in office buildings.* ASHRAE Transactions, 1988, vol. 104, pp. 1034-1049.

IWATA T., SOMEKAWA N., TOKURA M., et al. *Subjective response on discomfort glare caused by windows*. CIE 22nd Session, 1991, pp. 108-109.

LITTLEFAIR P. and LINDSAY C. *Occupant use of venetian blinds in offices*. PD 233/92. Watford: Building Research Establishment, 1993.

OSTERHAUS W. *Brightness as a simple indicator for discomfort glare from large area glare sources.* 1st CIE Symposium on Lighting Quality, Ottawa, Canada, 1998, pp. 113-124.

PEREZ R., INEICHEN P. and SEALS R. *Modelling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance*. Solar Energy, 1990, vol. 44, n°5, pp. 271.

REA M. Window blind occlusion: a pilot study. Building and environment, 1984, vol. 19, n°2, pp. 133-137.

VELDS M. Assesment of lighting quality in office rooms with daylighting systems. Delft, Germany: Technische Universiteit Delft, 1999, 209 p.

## **Chapitre 3**

AFNOR. Principes d'ergonomie visuelle applicable à l'éclairage des lieux de travail (NF X 35-103). AFNOR, 1990.

BONNET C. *Manuel pratique de psychophysique*. Paris : Armand Colin, 1986, 254 p.

COURRET G., PAULE B. and SCARTEZZINI J.-L. *Gestion optimale des stores à lames orientables*. CISBAT 93, Lausanne, Suisse, 1993, pp. 333-338.

DUMORTIER D. Mesure, analyse et modélisation du gisement lumineux. Application à l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments. Thèse de doctorat. Chambéry: Université de Savoie, 1995, 388 p.

DUMORTIER D. and VAN ROY F. *Daylighting information throughout Europe using the Satel-Light and Soda Internet servers.* EPIC 2002 AIVC, Lyon, France, 2002, pp. 637-642.

DUMORTIER D. and VETRO P. *Luminance Calibration of the Nikon Coolpix digital camera*. LUX EUROPA 2001, Reykjavik, Iceland, 2001, pp. 341-345.

FABER O. Occupancy data for thermal calculations in non-domestic buildings. F3/31158. Building Research Establishment, 1992.

FOSTER M. and ORESZCZYN T. Occupant control of passive systems: the use of venetian blinds. Building and environment, 2001, vol. 36, pp. 149-155.

HYGGE S. and LOFBERG H. A. User evaluation of visual comfort in some buildings of the daylight europe project. Right Light 4, 1997, pp. 69-74.

INOUE T., KAWASE T., IBAMOTO T., et al. *The developement of an optimal control system for window shading deveices based on investigations in office buildings.*ASHRAE Transactions, 1988, vol. 104, pp. 1034-1049.

ISO. Déterminantion des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique (EN ISO 7730). ISO, 1995.

LAURENTIN C. Etude expérimentale de la qualité des ambiances lumineuses dans les bureaux en conditions de lumière mixte et d'ambiances thermiques variées. Thèse de doctorat. Lyon: ENTPE, 2001.

MACWORLD U. Comparatif: Neuf grands écrans LCD 18 pouces ou plus. Univers Macworld, 2001, pp. 38-40.

NICOL F. Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds heaters and fans. 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

OSTERHAUS W. Discomfort glare from daylight in computer offices: what do we really know? Lux Europa 2001, Reyklavik, Iceland., 2001.

REA M. Window blind occlusion: a pilot study. Building and environment, 1984, vol. 19, n°2, pp. 133-137.

REINHART C. F. Daylight Availability and Manual Lighting Control in Office Buildings - Simulation Studies and Analysis of Measurement. Thèse de doctorat. Freiburg, Germany: Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme, 2001, 129 p.

RIHAOUI I. *Probabilités et statistiques. Cours de 1ère année.* Vaulx-en-Velin: ENTPE, 2001.

SUTTER Y., DUMORTIER D. and FONTOYNONT M. *Prediction of recommended venetian blinds positions to satisfy visual comfort and performance conditions throughout Europe: a case study.* LUX EUROPA 2001, Reykjavik, Iceland, 2001, pp. 250-254.

VAN DIJK D., ZONNEVELDT L. and HENRIKSEN C. Daylight products with redirecting visual properties (REVIS project). Selected visual comfort criteria for office room. Rapport 17, The Netherlands, 2001.

VELDS M. Assesment of lighting quality in office rooms with daylighting systems. Thèse de doctorat. Delft, Germany: Technische Universiteit Delft, 1999, 209 p.

### **Chapitre 4**

DUMORTIER D. and VAN ROY F. *Daylighting information throughout Europe using the Satel-Light and Soda Internet servers.* EPIC 2002 AIVC, Lyon, France, 2002, pp. 637-642.

FONTOYNONT M. Lumière et bien-être. Lyon, France: Hexcel Fabrics, 2000.

GUILLEMIN A. and MOREL N. *An innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system.* Energy and Building, 2001, vol. 33, pp. 477-487.

REINHART C. F. Daylight Availability and Manual Lighting Control in Office Buildings - Simulation Studies and Analysis of Measurement. Thèse de doctorat. Freiburg, Germany: Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme, 2001, 129 p.

VELDS M. Assesment of lighting quality in office rooms with daylighting systems. Thèse de doctorat. Delft, Germany: Technische Universiteit Delft, 1999, 209 p.

### Annexes

Annexe 1. Description des sites de mesure et du matériel.

Annexe 2. Questionnaire.

Annexe 3. Conditions météorologiques sur le site de mesures durant la campagne.

Annexe 4. Fréquences de dépassement d'éclairement verticaux en fonction de l'orientation.

# Annexe 1

Description des sites de mesure et du matériel

L'enregistrement en continu durant trente semaines du comportement d'usagers en situation de travail sur écran de visualisation, face à l'utilisation de leurs protections solaires, a nécessité un travail en amont conséquent.

En effet, l'idée de départ consistant à suivre le comportement d'une vingtaine de sujets, chacun dans un bureau individuel, s'est rapidement avérée difficile à mettre en place. Après avoir envisagé d'aller mener cette campagne ailleurs qu'à l'ENTPE (même à l'étranger!), il nous a paru plus sage de travailler sur notre site, en rapport à tous les problèmes de maintenance qu'allaient occasionner notre installation. A posteriori, le site ayant nécessité une maintenance quasi-quotidienne, nous n'avons pas regretté notre choix !

Après avoir pris cette décision, il restait à trouver des bureaux correspondants à nos besoins. Notre choix s'est porté sur huit bureaux individuels, tous donnant sur une cour intérieure. Nous sommes en avril 2001.

Entre avril et juillet 2001 ont eu lieu l'achat du matériel nécessaire (cellules Licor de mesure d'éclairement, avec l'étalonnage, capteurs de présence) et la prise de contact avec les différentes parties concernées : SOMFY pour la fourniture des moteurs de stores, FRANCIAFLEX pour l'intégration des moteurs aux stores vénitiens, LYON STORES pour la pose des stores et la société PERDRIX ELECTRICITE, pour les réfections électriques.

Entre septembre 2001 et janvier 2002 ont eu lieu les travaux réfection et d'installation, ainsi que le développement du logiciel d'acquisition de toutes les données (réalisé par Alexandre Aleya de la société SOMFY).

### 1. Choix du site de mesures.

Nous avons sélectionné huit bureaux individuels situés dans les locaux de l'ENTPE, ils sont orienté sud-est et donnent sur une cour intérieure (voir figures a.1, a.2 et a.3). Avant la pose des stores vénitiens motorisés, chaque bureau disposait de son type de protection solaire: store vénitien à lames beiges, roses ou vertes pour les uns et store californien à lames beiges verticales pour les autres. On peut juger du panaché de couleurs et de styles sur la figure a.1. La pose des stores vénitiens tous identiques, a permis de rendre la façade un peu plus présentable, voir figure a.2.



Figure a.1: Façade avant la pose des stores vénitiens motorisés.

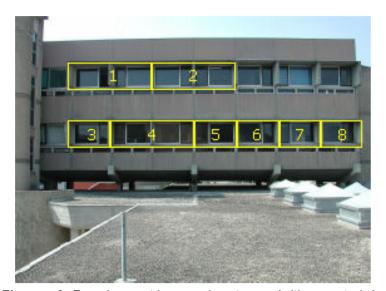


Figure a.2: Façade avant la pose des stores vénitiens motorisés.



Figure a.3: Vue depuis les bureaux.

Chaque fenêtre de cette façade est entourée d'une "casquette" en béton limitant ainsi la pénétration du rayonnement solaire direct. Ce détail architectural n'était pas vraiment là pour nous arranger, étant donné que l'utilisation des protections solaires était par là même modifiée de manière non négligeable. On peut en fait dire que les sujets situés dans ces bureaux bénéficient d'un micro-climat lumineux, puisque le rayonnement solaire direct pénétrant dans leur espace n'est pas le même que pour une façade classique orientée de la même façon. Cependant, comme il n'était pas question de démolir ces avancées, nous en avons tenu compte dans nos mesures. En effet, nous avons mesuré deux valeurs d'éclairement extérieur, la première sans effet de la casquette (cellule haute), et la seconde, collée directement à une fenêtre, donc caractérisant réellement la lumière pénétrant dans le bureau (cellule basse) (voir figure a.4).

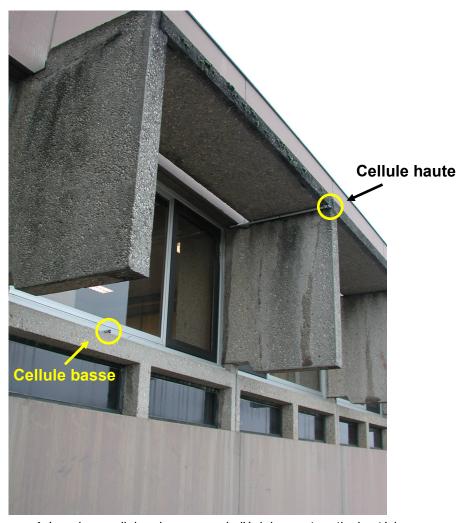


Figure a.4: Les deux cellules de mesure de l'éclairement vertical extérieur.

Les occupants de ces bureaux (six femmes et deux hommes) effectuaient essentiellement du travail administratif sur écran.

Cinq bureaux sont des bureaux simples (2.4 m de largeur sur 4 m de profondeur) et trois sont doubles (4.8 m de largeur sur 4 m de profondeur). Mais tous ne sont occupés que par un seul individu.

|  | Photo | Descriptif et remarques particulières.   |  |
|--|-------|--|--|
| D203<br>Bureau simple<br>3 sur la figure a;1 |       | L <sub>écran</sub> = 43 cd/m <sup>2</sup> L'écran a été déplacé légèrement au début de la campagne. Il était ensuite à 2m de la baie.                            |  |
| D204<br>Bureau double<br>4 sur la figure a.1 |       | L <sub>écran</sub> = 85 cd/m <sup>2</sup> Comportement photophile affirmé dès le départ de la campagne par le sujet. Confirmé ensuite par l'analyse des données. |  |
| D205<br>Bureau simple<br>5 sur la figure a.1 |       | L <sub>écran</sub> = 15 cd/m <sup>2</sup> Sujet arrivé en mars 2002; pour une durée de 4 mois, il n'a donc pas connu l'espace sans les store motorisés.          |  |
| D206<br>Bureau simple<br>6 sur la figure a.1 |       | L <sub>écran</sub> = 40 cd/m <sup>2</sup>  |  |
| D207<br>Bureau simple<br>7 sur la figure a.1 |       | L <sub>écran</sub> = 50 cd/m <sup>2</sup> , au début de la campagne. Nouvel écran à 105 cd/m <sup>2</sup> en avril 2002.   |  |

 $L_{\text{écran}} = 19 \text{ cd/m}^2 \text{ au début de la}$ campagne. Luminance modifiée à 37 cd/m<sup>2</sup> D208 le 1<sup>er</sup> iuillet 2002. Bureau simple Présence d'une petite fenêtre 8 sur la figure a.1 verticale parasite dans le dos du sujet. Fenêtre masquée en même temps que l'écran a été modifié.  $L_{\text{écran}} = 15 \text{ cd/m}^2 \text{ au début de la}$ campagne. Ecran équipé d'un D302 Bureau double dispositif anti-reflet. Celui-ci a été supprimé le 1er juillet 2002, la 1 sur la figure a.1. luminance est passée à 75 cd/m<sup>2</sup>.  $L_{\text{écran}} = 81 \text{ cd/m}^2$ . Seul bureau où l'écran regarde la baie. Dès le départ, le sujet a D303 affirmer utiliser ses stores Bureau double essentiellement pour supprimer le 2 sur la figure a.1 reflet sur son écran. Confirmé ensuite par l'analyse des résultats.

Table a.1: Description des huit bureaux utilisés pour la campagne de mesures.

Dans chacun de ce bureau, on souhaite mesurer toutes les quinze minutes:

- Le niveau d'éclairement sur l'écran
- L'état de l'éclairage artificiel
- La température ambiante à l'intérieur du bureau
- La présence du sujet
- La position du store vénitien (hauteur et inclinaison des lames)
- L'éclairement vertical extérieur.

Afin de pouvoir réaliser ces mesures, plusieurs modifications du site sont nécessaires.

### 2. Modifications à apporter au site.

Comme on peut le constater sur la figure a.1 ou sur la table a.1, les fenêtres se décomposent en plusieurs parties. Une partie haute, classique, et une partie basse appelée allège, qui n'est pas masquée par un store vénitien. Conscients du fait que cette source de lumière naturelle non contrôlée par les stores vénitiens, pouvait être une source parasite, nous avons décidé de l'occulter.

Si l'idéal aurait été de la masquer totalement à l'aide d'un matériau plein, le souhait des occupants de ces bureaux en était autrement. Nous ne pouvions pas les priver de cette source de lumière naturelle. D'un commun accord, nous avons décidé de placer sur ces petites surfaces vitrée un film solaire de couleur grise dont le coefficient de transmission lumineuse vaut moins de 10 %. Nous avons ainsi réduit, dans la mesure du possible, le bruit occasionné par ces sources sur les mesures de l'éclairement sur l'écran.

La partie la plus difficile à mettre en œuvre fut l'installation des stores vénitiens motorisés, pilotés par une télécommande à disposition de chacun des huit sujets. Avant de procéder à l'installation proprement dite, des travaux de réfection électrique ont été nécessaires afin de ne pas surcharger le dispositif électrique existant. Un nouveau disjoncteur a alors été installé. Les moteurs des stores vénitiens fonctionnant en 24 Volts continu, dans chaque bureau une alimentation séparée a été installée. Tous ces travaux de cablage et d'électricité ont été assurés par la société Perdrix Electricité.

En effet, comme nous souhaitions pouvoir enregistrer la position de chaque store toutes les quinze minutes, tous les stores vénitiens devaient être équipés d'un moteur spécial, dit à encodeur. Les moteurs à encodeur sont ceux utilisés dès lors que l'on veut pouvoir piloter un store à l'aide d'une consigne donnée par une centrale, en général un PC. Ces moteurs contiennent plusieurs composants:

- Un récepteur infra-rouge recevant le signal donné par les télécommandes de pilotage des stores.
- Le moteur en lui-même, inséré dans la partie haute du vénitien.
- Le boîtier de commande du moteur 2DCE.

Voir le schéma du réseau sur la figure a.5.

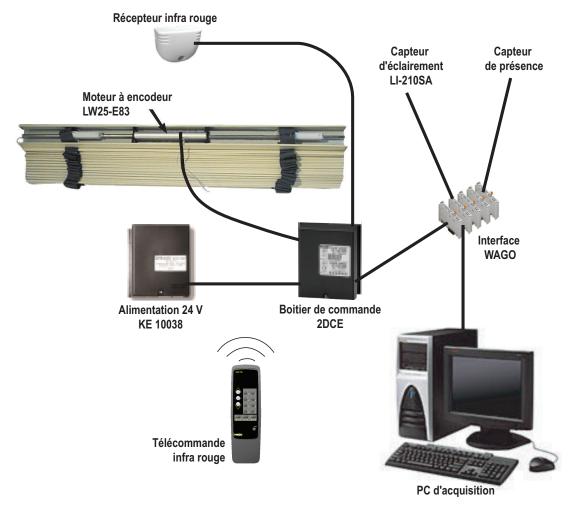


Figure a.5 : Schéma du réseau.

Il est également possible de prendre la démarche inverse, c'est-à-dire d'acquérir une position du store qui a été donnée par une consigne manuelle. C'est ce que nous avons fait.

Pour cela il a fallu relier chacun des moteurs des stores (24 au total) à un PC d'acquisition via un réseau appelé Lon Works. Ce système est basé sur la notion de réseaux. Voir le PC d'acquisition sur la figure a.6.

Tous les stores étaient donc reliés au PC à l'aide de ce réseau Lon Works via une interface de type WAGO qui permet de connecter plusieurs types d'entrées: analogiques (comme les cellules d'éclairement) ou numériques (comme les cellules de présence).

Un logiciel d'acquisition permet au PC de recevoir le signal envoyé par le boitier WAGO et de stocker les données de chacun des 24 stores vénitiens: hauteur du store exprimée en pourcentage d'ouverture (100 = store remonté, 0 = store baissé) et inclinaison des lames entre 20° et 165° (angles inférieurs à 90° = lames inclinées vers le sol extérieur, angles supérieurs à 90° = lames inclinées vers le ciel).

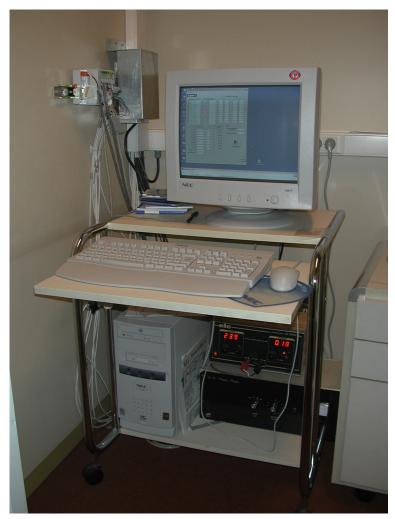


Figure a.6: PC d'acquisition

### 3. Matériel de mesure.

En plus de la position des stores vénitiens, nous avons mesuré les éclairements intérieurs et extérieurs, la présence des occupants, l'état de l'éclairage artificiel et la température ambiante.

#### Mesure des éclairements.

Les éclairements extérieurs ou sur l'écran de visualisation ont été mesurés à l'aide de cellules Li-cor LI-210SA. Ces cellules délivrent un signal en courant proportionnel à l'éclairement mesuré, avec un maximum de 30 µA pour 100 klux. L'interface WAGO, qui avait pour role de centraliser les signaux avant de les transmettre au PC d'acquisition, ne pouvait recevoir que des signaux en courant. Il a donc fallu transformer le signal délivré par les cellules en microampères en une tension entre 0 et 10 Volts, à l'aide d'un amplificateur fabriqué par un technicien de l'ENTPE.

Les cellules intérieures et extérieures n'ont pas été calibrées de la même façon étant donné qu'elles ne mesurent pas la même plage d'éclairement. Nous avons estimé qu'à l'extérieur, les valeurs mesurées seront inférieures à 100 klux et à l'intérieur nous avons choisi de limiter les relevés à 5 klux. Cette dernière valeur de 5 klux à

l'intérieur peut paraitre restrictive, cependant il est tout de même très rare qu'un occupant tolère 5 klux sur son poste de travail avant d'agir sur sa protection solaire.

Tenant compte de cela ainsi que de la plage de courant délivrée par chaque capteur photométrique, la précision des cellules placées à l'intérieur est de 2.08 lux et à l'extérieur de 33.28 lux.

La valeur stockée sur le PC n'était pas directement la valeur de l'éclairement mesuré mais une quantité proportionnelle à l'éclairement. Ainsi, chacune des cellules a nécessité un étalonnage spécifique. Pour obtenir la valeur de l'éclairement mesuré, il fallait diviser la valeur enregistrée sur le PC, par le coefficient correctif, différent pour chaque capteur, donné par la table a.2. Ces valeurs ont été obtenues en effectuant une dizaine de mesures consécutives et simultanées de l'éclairement et du signal lu sur le PC.

| Cellule      | Coefficient correctif |
|--------------|-----------------------|
| Extérieure 1 | 0.32                  |
| Extérieure 2 | 0.32                  |
| D203         | 6.46                  |
| D204         | 6.86                  |
| D205         | 6.70                  |
| D206         | 6.04                  |
| D207         | 9.83                  |
| D208         | 5.74                  |
| D302         | 11.70                 |
| D303         | 12.18                 |

Table a.2 : Coefficients correctifs du signal d'éclairement stocké par le PC

Mesure de la présence des occupants.

Afin de ne conserver que les données significatives du comportement de l'individu, il a fallu enregistrer les moments où celui-ci était présent dans son bureau.

Cette information a été donnée par des détecteurs de présence de type surveillance. Ce sont des détecteurs à infrarouge passifs volumétriques. Le modèle utilisé est l'Infromin V fabriqué par la société italienne Tecnalarm.

Chaque capteur placé dans les huit bureaux est à contact sec, c'est-à-dire que lorsqu'il y a mouvement dans la pièce, le contact est enclenché. C'est un fonctionnement en tout ou rien.

D'autre part, les moteurs des stores vénitiens fonctionnaient en 24 Volts continu, il a donc fallu installer une alimentation stabilisée adaptée. L'interface WAGO, apte à recevoir des signaux numériques, recevait les signaux émis par les détecteurs. Les acquisitions PC se faisant toutes les quinze minutes, si le détecteur restait silencieux durant plus de dix minutes avant l'acquisition, l'occupant était considéré comme absent.

Mesure de l'état de l'éclairage artificiel et de la température ambiante.

Les données de température et d'état de l'éclairage artificiel ont été stockées sur des data loggers autonomes de type HOBO RH/TEMP/LI. Ces dispositifs étaient

programmés (quantité mesurée, période d'acquisition) à l'avance via un PC, et les données devaient être récupérées manuellement sur le PC tous les 86 jours dans notre cas.

Une fois tout ce dispositif installé, la campagne de mesure a pu démarrer, le 23 janvier 2002. Les résultats de l'acquisition de toutes ces données sont présentés dans le chapitre 3.

# Annexe 2

Questionnaire

| Pro<br>Bu<br>Po | om :<br>énom :<br>ireau :<br>este :<br>ge :  |
|-----------------|--|
| 1)              | Avez-vous choisi l'aménagement de votre bureau?<br>oui   |
|                 | non  |
|                 | Si non, souhaiteriez-vous changer la disposition du mobilier?<br>oui (précisez pourquoi)   |
|                 | non  |
| 2)              | Avec combien de personnes partagez-vous votre bureau? vous êtes le seul occupant   |
|                 | une autre personne   |
|                 | entre deux et cinq personnes   |
|                 | entre cinq et dix personnes  |
|                 | plus de dix personnes  |
| 3)              | Si vous n'êtes pas seul(e) dans votre bureau, vous arrive-t-il d'être en désaccord avec vos collègues quant au réglage du positionnement du store?  Toujours |
|                 | Souvent  |
|                 | Rarement   |
|                 | Jamais   |
| 4)              | La fenêtre est-elle équipée d'un store motorisé?<br>oui  |
|                 | Considérez-vous la motorisation comme nécessaire à votre confort? oui  |
|                 | non  |
|                 | Si le store n'était pas motorisé, en feriez-vous une utilisation différente?<br>oui  |

|    |                          | non  |
|----|--------------------------|--|
|    | non                      | En feriez-vous une utilisation différente s'il était motorisé?<br>oui<br>non   |
| 5) | Combi                    | ien de fois par jour actionnez-vous le store?  |
|    | une ou                   | ı deux fois  |
|    | entre d                  | deux et cinq fois  |
|    | plus d                   | e cinq fois  |
| 6) |                          | dérez-vous cette action comme ennuyeuse?<br>récisez pourquoi)  |
|    | non                      |  |
| 7) | Utilise<br>oui           | ez-vous le store chaque fois que vous en ressentez le besoin?  |
|    | non (p                   | orécisez pourquoi)   |
| 8) | store. génar Ta Ro Lu Te | nent jugez-vous les situations suivantes en termes de priorité d'utilisation de Classez les réponses (1: situation la plus génante, 5 situation la moins nte) ache solaire sur le bureau eflet sur l'écran de visualisation uminosité de la fenêtre trop importante empérature trop élevée ontraste trop important entre l'écran et l'arrière plan |
| 9) | Votre<br>oui             | poste de travail est-il équipé d'une lampe de bureau ?   |
|    | non                      |  |
|    | Si oui,<br>Toujo         | l'utilisez-vous :<br>urs   |

|     | Souvent   |
|-----|---|
|     | Rarement  |
|     | Jamais  |
|     | Si non, pensez-vous qu'une lampe de bureau pourrait améliorer vos conditions de travail? oui  |
|     | non   |
| 10  | )Utilisez-vous l'éclairage artificiel quand le store est baissé?<br>oui   |
|     | non   |
|     | Si oui, pourquoi?   |
|     |   |
| 11  | )Préférez-vous travailler avec :  De la lumière naturelle   |
|     | De la lumière artificielle  |
|     | Une combinaison des deux  |
| 12) | D'une manière générale, comment jugez-vous le niveau de luminosité (lumière naturelle et artificielle confondues )?  Pas assez de lumière Correct Trop de lumière |
| •   | sur votre bureau  |
| •   | dans la pièce en général  |
| •   | sur votre écran de visualisation  |
| 13) | Etes-vous ébloui(e) ou gêné(e) par l'éclairage naturel provenant<br>Souvent Parfois Jamais  |
|     | a) de la voute céleste  |
|     | b) du soleil  |
|     | c) des réflexions sur les batiments en face   |
| 14) | Ces différentes sources lumineuses causent-elles, en termes de gêne, des réflexions dans votre environnement ?  |

Très gênantes Assez gênantes Peu gênantes Pas du tout

| b) le luminaire de bureau  |
|--|
| c) la lumière naturelle  |
| 15) Si certaines réflexions sont gênantes, où se produisent-elles ? Sur votre écran de visualisation |
| Sur des feuilles de papier   |
| Autre (précisez)   |
| 16)Comment jugez-vous de manière générale l'ambiance dans votre bureau?  Lumineuse                   |
| Sombre   |
| Non uniformément éclairée  |
| 17)Pour vous, avoir une fenêtre dans son bureau, est-ce : Très important                             |
| Assez important  |
| Pas important  |
| 18)La vue extérieure depuis votre poste de travail vous satisfait-elle? oui (précisez pourquoi)      |
| non (précisez pourquoi)  |
| 19)Vous arrive-t-il de travailler uniquement avec la lumière naturelle?  Toujours                    |
| Souvent  |
| Rarement   |
| Jamais   |
| 20) Avez vous trop chaud quand les rayons du soleil pénètrent à l'intérieur de la pièce Toujours     |

a) l'éclairage artificiel général

| Souvent  |
|--|
| Rarement   |
| Jamais   |
| 21) En cas de reflet de la fenêtre (uniquement) sur l'écran, que faites-vous?<br>Vous actionnez le store |
| Vous inclinez l'écran  |
| Autre (précisez)   |
| 22) Pensez-vous que votre manière de manipuler votre protection solaire soit dépendante des saisons ?    |
| oui (précisez pourquoi)  |
|  |
| non  |
| 23)Modifiez-vous le contraste de votre écran? Souvent  |
| Parfois  |
| Jamais   |
|  |
| 24) Combien d'heures par jour travaillez-vous devant votre écran?  Moins de 2 heures                     |
| Entre 2 et 4 heures  |
| Entre 4 et 6 heures  |
| Toute la journée   |
| 25) Diriez-vous que vos conditions de travail sur écran sont<br>Bonnes                                   |
| Acceptables  |
| Mauvaises  |
| 26)Vous considérez vous comme sensible à l'éblouissement?  |
| non  |
|  |

| 27)Portez-vous des lunettes de soleil en été, à l'extérieur ? |
|---|
| Toujours  |
| Parfois   |
| Jamais  |

# Annexe 3

Conditions météorologiques sur le site de mesures durant la campagne de mesures.

# Annexe 4

Fréquences de dépassement d'éclairement verticaux en fonction de l'orientation.