

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département d'architecture



Mémoire de master en Architecture

Spécialité : Architecture

Option : Architecture et Environnement

L'éclairage naturel dans les salles d'enseignements
Cas d'étude : les ateliers du département d'architecture
de Tamda.

Présenté par : MESSIS Manel.

Encadré par M^r AIT KACI Zohir

Année Universitaire 2015-2016

Résumé

La lumière naturelle a un effet positif sur la santé humaine, le bien-être, le confort visuel et les performances des étudiants. Dans les écoles, il a été prouvé que la lumière naturelle joue un rôle important dans le processus d'apprentissage et le comportement des élèves. Il est important de souligner qu'elle a également pris un rôle important dans l'architecture durable.

Cette recherche s'intéresse à l'évaluation de la qualité de l'éclairage dans les salles d'enseignement, dans le but de déterminer le niveau du confort visuel et de déceler la présence d'éventuelles gênes dues à la lumière dans ces espaces, ainsi que l'étude de stratégies de la lumière naturelle dans le but d'assurer le confort visuel des étudiants.

Afin de mieux cerner notre objet d'étude nous avons choisi comme cas d'étude le département d'architecture de Tamda, pour y parvenir, une série d'outils et de méthodes complémentaires a été utilisées tels que : l'observation, questionnaire, campagne de mesure sur terrain ou la simulation numérique.

En dépit de la grande variété des environnements lumineux étudiés, la majorité des occupants sont touchés par l'éblouissement. La simulation numérique a révélée qu'en hiver plus en s'éloigne des fenêtres le niveau d'éclairement diminue considérablement (présence de coins sombres) dans les ateliers. Le contrôle de l'éclairage intérieur ressort comme une forte aspiration des occupants, que ce soit par rapport à l'éclairage naturel ou artificiel.

Mot clés : lumière naturelle, confort visuel, salles d'enseignement, éclairage intérieur, éblouissement.

Abstract

Daylighting has a positive effect on the human health, the wellness, visual comfort and student performances. In schools, it was proven that the natural light plays a significant role in learning process and pupils' behavior. It is important to stress that it also took a significant role in sustainable architecture

This research is based on the evaluation of the quality of lighting in the classrooms, in order to determine the level of visual comfort and to detect the presence of any discomfort due to the lights in these fields, and the study of strategies of daylighting in order to ensure a visual comfort for students.

To better understand our subject we have chosen as a case study the department of architecture of Tamda, to achieve this, a series of tools and complementary methods were used such as: observation, questionnaire measuring companion on land or numerical simulation.

Despite the variety of the studied light environments, the majority of occupants are affected by glare. Numerical simulation revealed that in winter when we move away from windows, the light level drops significantly (presence of dark corners) in the workshops. The interior lighting control brings out as a strong aspiration of the occupants, whether in relation to the daylighting or artificial lighting.

Key words: natural lights, visual comfort, classrooms, interior lighting, glare.

Chapitre introductif

Introduction...	01
Problématique...	02
Hypothèses	03
Objectif	03
Méthodologie de recherche...	03
Structure du mémoire...	04

Chapitre 1 : Les notions de bases.

I- Grandeurs photométriques	06
I-1- Flux lumineux	06
I-2 Intensité lumineuse	06
I-3 Eclairement	06
I-4 Luminance	07
II- Sources de lumière	07
II-1 Les rayonnements électromagnétiques	07
II-2 le soleil source principale	08
II-3 le ciel source secondaire	09
II-4 Le facteur de lumière du jour (FLJ)	11
III-Appareil d'éclairage	12
III-1 Caractéristiques des lampes	12
III-1-1 L'efficacité lumineuse	13
III-1-2 La température de couleur	13
III-1-3 L'indice de rendu des couleurs (IRC ou Ra)	13
III-1-4 La durée de vie	13
III-1-5 Tableau comparatif	14

IV-Le confort visuel	14
IV-1 lumière et la vision	14
IV-1-1-La vision.	14
IV-1-2 La perception de l'intensité lumineuse	15
IV-1-3 La sensibilité aux contrastes	16
IV-1-4 La perception des distances	17
IV-1-5 La distinction des couleurs	17
IV-1-6 L'acuité visuelle	18
IV-1-7 Le champ visuel	18
IV-1-8 L'influence du psychisme	19
V-2 Les paramètres du confort visuel	20
V-2-1- Le niveau d'éclairement	21
V-2-2 Un rendu des couleurs correct	22
V-2-3 La répartition de la lumière	22
V-2-4 Les rapports de luminance	22
V-2-5-Les ombres gênantes	23
V-2-6 La relation au monde extérieur	23
V-2-7 Une teinte de lumière agréable	23
V- L'éblouissement	25
VI-1 L'éblouissement direct et l'éblouissement indirect	26
VI-2 L'éblouissement perturbateur et l'éblouissement invalidant	26
VI-3 L'éblouissement dû à l'éclairage naturel	27
VI-4 Cas particulier des écrans d'ordinateurs	27
Conclusion	29

Chapitre 2 : Les stratégies de la lumière naturelle.

I- les stratégies de la lumière naturelle	31
I-1 Capter	31
I-2 Transmettre	33

I-2-1 Les caractéristiques de la fenêtre.....	34
I-2-2 les dimensions du local.....	36
I-2-3 l'aménagement intérieur du local.....	36
I-3 Distribuer	37
I-3-1 L'agencement des parois intérieures.....	38
I-3-2 Le matériau des surfaces du local.....	38
I-3-3 Les zones de distribution lumineuse.	39
I-2-4 Les systèmes de distribution lumineuse.....	39
I-2-5 Les conduites solaires.....	39
I-4 Se protéger.....	41
I-4-1 Les types de protections solaires.....	42
I-5 Contrôler.....	49
I-5-1 les systèmes adaptable.....	50
I-5-2 les systèmes de gestion de l'éclairage artificiel.....	50
II- Expérience et Exemple sur des équipements éducatifs	50
II-1 Expérience N°1 :« L'impact de l'éclairage sur l'apprentissage et la productivité »	51
II-2 Expérience N°2 :« L'effet de la lumière sur les performances des élèves »	52
II-2-1 Réalisation de l'éclairage optimisé sur le plan biologique dans le cadre de l'étude.....	53
II-2-2 Synthèse de l'étude sur l'éclairage des écoles.....	53
II-3-le lycée Freiherr-vom-Stein-Gymnasium à Münster.....	54
III-Règlementation et normes relatives à l'éclairage intérieur des salles d'enseignement.	55
Conclusion.....	59

Chapitre 3 : Cas d'étude : Analyse expérimentale et simulation numérique

I-Présentation du cas d'étude.....	61
I-1-Situation et organisation.....	61
I-2 Orientation et ensoleillement.....	62
<i>I-1-1 Composition des façades.....</i>	<i>62</i>
<i>I-1-2 Critère de choix.....</i>	<i>63</i>
I-2-Description des ateliers	64
<i>I-2-1- Atelier A.....</i>	<i>64</i>
<i>I-2-2-Atelier B.....</i>	<i>65</i>
<i>I-2-3-Salle de travaux dirigés C.</i>	<i>66</i>
II-Méthodes et outils d'évaluation	68
II-1-Observation et questionnaire	68
II-2-La prise de mesure.	68
II-3-La simulation numérique.....	68
III- Enquête par questionnaire.....	69
III-1-Présentation du questionnaire	69
III-2-lecture et interprétation des résultats.	69
<i>III-2-1-Tranche d'âge, statut et horaire d'occupation de l'atelier.</i>	<i>69</i>
<i>III-2-2-Emplacement des occupants.</i>	<i>69</i>
<i>III-2-3-Type d'activité.</i>	<i>69</i>
<i>III-2-4-Choix du lieu du travail.</i>	<i>70</i>
<i>III-2-5-Appréciation de la lumière naturelle dans l'atelier.</i>	<i>71</i>
<i>III-2-6-L'intensité de la lumière naturelle dans l'atelier.</i>	<i>72</i>
<i>III-2-7-Gêne due aux rayons solaires.....</i>	<i>72</i>
<i>III-2-8-Gêne due aux reflets des rayons solaires sur le plan de travail (papier, calque, ordinateur.....).</i>	<i>73</i>
<i>III-2-8-Solutions préconisées par les occupants.....</i>	<i>74</i>
<i>III-2-9-Sources d'éblouissement.....</i>	<i>75</i>
<i>III-2-10- Utilité de l'éclairage artificiel.</i>	<i>76</i>

III-3 Conclusion du questionnaire	76
IV-Compagne de mesure	78
IV-1-Mesures photométriques des ateliers étudiés.....	78
<i>IV-1-1-Description et fonctionnement du luxmètre utilisé.....</i>	<i>78</i>
IV-2-Procédure de mesures.....	79
IV-3-Prise de mesures.....	80
IV-4- Comparaison des résultats.....	85
V-Simulation numérique.....	87
V-1 présentation du logiciel utilisé.....	87
V-2 Modélisation des ateliers et Les grilles de résultats.....	87
<i>V-2-1- Conditions semblables à celles de la compagne de mesures.</i>	<i>88</i>
<i>V-2-2- Conditions défavorables (hiver, ciel couvert).....</i>	<i>91</i>
Conclusion.....	93
Recommandations et conclusion.....	94
Bibliographie	99

Chapitre introductif

Introduction :

A travers l'histoire et à nos jours, la lumière naturelle est une source d'inspiration pour les civilisations et les architectes, elle constitue un élément vital pour l'homme, et en tant que partie incontournable de son quotidien. La lumière nous assure la perception du monde qui nous entoure et, nous permet plusieurs lectures de l'espace. Avant l'avènement de l'éclairage artificiel, la lumière naturelle était une source d'éclairage indispensable dans les bâtiments. La relation entre ces deux derniers se traduisait à travers plusieurs paramètres (les plans, la forme, l'orientation, les dimensions des espaces et des ouvertures) ; les quels offrent des ambiances lumineuses différentes et infinies en fonction des conditions climatiques, des saisons et de l'heure.

Depuis la seconde moitié du vingtième siècle, l'accession à l'éclairage artificiel a libéré les bâtiments de leur dépendance vis-à-vis de l'extérieur. Cette libération a engendré, une rupture entre l'architecture et la lumière naturelle d'une part et, une croissance de la demande de l'énergie électrique des bâtiments d'autre part. De cet état de fait, l'architecte, tout en négligeant l'environnement et le confort des utilisateurs, s'est incliné en faveur de l'éclairage artificiel contenu de la facilité de son intégration aux espaces.

Seulement, après la prise de consciences du réchauffement climatique et l'introduction du développement durable, par souci de conjuguer entre un confort visuel optimal et un gain d'énergie, l'éclairage naturel est de plus en plus privilégié lors de la conception des édifices. Le dit éclairage est rendu plus efficace grâce à la libération de la structure.

Nonobstant les retombées de l'économie de l'énergie, le confort visuel constitue aussi un grand défi qui se dresse face à la conception et la nature de l'éclairage intérieur, compte tenu de l'impact de cette dernière sur le bien être des occupants.

Selon « Royal Philips Electroniques » (A.Van Troos, 2009), les Effets physiologiques de la lumière : régulation du sommeil, de l'humeur et de l'énergie par la lumière.

Depuis l'aube des temps, l'homme se lève et se couche avec le soleil. Notre horloge biologique s'est adaptée aux signaux quotidiens de la lumière et de l'obscurité. Elle utilise ces repères pour réguler nos cycles de sommeil et d'énergie. Ces cycles constituent le rythme circadien (du latin : environ un jour). Ils régulent également notre humeur et notre énergie. Le jour, la lumière du soleil nous vivifie ; la nuit, nous sommes plus réservés et perdons notre dynamisme.

« Il est souvent facile d'apprendre parce que le cerveau des gens travaille comme d'incroyables éponges qui sont capables d'absorber la connaissance sans limites. Mais seulement lorsque nous réussissons à garder nos cellules cérébrales ouvertes par une éducation et une motivation appropriée ». (Stephen Jay Gould) (M. Jančuška, et M. Klepáč)

Par ailleurs, selon (Michal Jančuška, et Marián Klepáč), avant que nous soyons en mesure de nommer des choses et de comprendre la globalité des relations entre les choses, nous les percevons à travers nos yeux.

La lumière crée une atmosphère de communication positive entre l'enseignant et l'élève ; elle peut influencer positivement sur la capacité de concentration et l'efficacité des performances des élèves, créer les conditions dans lesquelles les élèves et les enseignants se sentent confortables et est particulièrement en mesure d'assurer la perception correcte des objets et les informations affichées.

Aujourd'hui, l'école moderne impose des exigences accrues sur les solutions d'éclairage. La stricte organisation de l'espace a fait place à l'exigence de souplesse. Les élèves d'aujourd'hui ne passent pas toute la journée à résoudre des tâches individuelles à leur bureau, ils travaillent en groupes et les bureaux les isolent. Les tableaux noirs classiques en bois sont remplacés par des interactifs ; le papier et le stylo sont remplacés par les ordinateurs. C'est pourquoi les solutions d'éclairage doivent s'adapter à ces changements.

En partant de cet enchaînement d'informations, nous nous sommes intéressés aux équipements éducatifs et avons choisi comme cas d'étude le département d'architecture du pôle universitaire de TAMDA.

Problématique :

La conception du département d'architecture de Tamda s'est inspirée des principes de l'architecture contemporaine par sa forme épurée et l'intégration de grandes ouvertures à savoir les murs rideaux et les fenêtres en hauteur. Ayant ouverts ses portes à l'enseignement depuis l'année universitaire 2008/2009, il a été conçu pour recevoir des étudiants en architecture de différents niveaux. Ses équipements pédagogiques, tout en étant équipés d'installation d'éclairage artificiel, comportent aussi suffisamment d'ouvertures (fenêtres et mur-rideau) à même de leur assurer un éclairage naturel.

Nous voudrions savoir si l'éclairage naturel de ces ateliers procure suffisamment de confort visuel aux occupants, d'une part et, s'il ne constitue pas, pour eux une source de gênes, d'autre part.

Pour ce faire, nous nous posons comme problématique le contenu des questions suivantes :

- *L'éclairage intérieur des ateliers du département d'architecture de TAMDA est-il adapté aux activités des étudiants ?*
- *Éclairage artificiel ou éclairage naturel, lequel des deux types d'éclairages (artificiel ou naturel) est le plus adéquat aux ateliers pour assurer un confort visuel ?*

Hypothèses :

Les ateliers du département d'architecture de Tamda, étant de conception et de réalisation récente qui supposent avoir bénéficié d'une étude ayant tenu compte des avancées conceptuelles et technologiques sont censés être dotés des meilleures moyens en mesures d'assurer des conditions optimales d'enseignements y compris l'éclairage.

Objectif :

A travers notre modeste étude nous visons comme principaux objectifs :

- Déterminer les paramètres de confort visuel dans les ateliers d'architecture ;
- Identifier les principales gênes ressenties par les occupants des ateliers ainsi que les sources dont elles découlent.
- Proposer, aux décideurs des lieux, des solutions éventuelles susceptibles d'apporter d'améliorer aux conditions d'éclairage actuel.

Méthodologie de recherche :

Notre étude se structure en deux parties principales, la première purement théorique et la deuxième expérimentale.

La première partie théorique a comme objectif la compréhension des notions de base, des caractéristiques de l'éclairage intérieur et des paramètres du confort visuel. Elle comporte une recherche bibliographique sur l'éclairage intérieur des espaces d'enseignement afin d'éclaircir certaines notion telles que l'influence du type d'éclairage sur l'apprentissage des étudiants, les stratégies de l'éclairage naturel...etc. dans le but de mieux saisir notre cas d'étude. Enfin, une revue des différentes normes et textes législatifs en vigueur relatifs à l'éclairage intérieur.

Cette partie théorique nous a permis de faire le point sur deux approches quantitative et qualitative de l'éclairage intérieur, et en tirer les critères susceptibles de concerner notre objet d'étude.

La deuxième partie expérimentale a comme objectif de tester l'appréciation des usagers d'un atelier d'architecture envers leur environnement lumineux. L'approche adoptée est établie en amont avec des techniques de simulation numérique et d'enquête sur le terrain, la confrontation de ces techniques sera l'essence de notre recherche. La phase opérationnelle est répartie sur deux étapes complémentaires ;

L'enquête sur le terrain premièrement avec un questionnaire, une observation et des mesures photométriques in situ comme techniques utilisées. Cette enquête concerne deux ateliers et une salle de travaux dirigés de Tamda ainsi que leurs occupants.

Un travail de modélisation vient compléter notre enquête avec une simulation numérique de l'éclairage intérieur, le but est de reconstituer des conditions lumineuses dans les ateliers de Tamda qu'on ne pouvait obtenir avec l'enquête sur le terrain, afin de caractériser d'éventuelles gênes visuelles liées aux usages d'un atelier d'architecture.

Structure du mémoire:

Partie théorique :

Introduction générale



Chapitre I :

Les notions de bases



Chapitre 2

Les stratégies de la lumière naturelle

Partie expérimentale :



Chapitre 3

Cas d'étude : Analyse expérimentale et simulation numérique



Recommandations et Conclusion

Chapitre 1

Les notions de bases

I- Grandeurs photométriques :

Soucieux de permettre une meilleure compréhension de l'éclairage en générale, nous rappellerons au préalable ces grandeurs photométriques à savoir :

I-1- Flux lumineux :

Le flux lumineux d'une source est l'évaluation, selon la sensibilité de l'œil, de la quantité de lumière rayonnée dans toutes les directions par cette source.

Symbole : Φ (Ph i)

Unité de mesure : lm (Lumen)

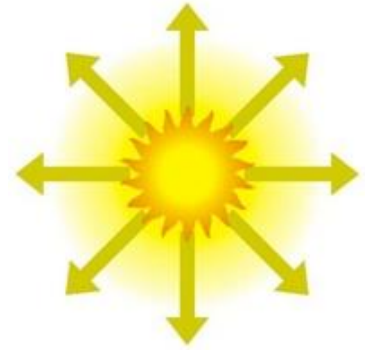


Figure 1 Flux lumineux
(source : A.DE HERBER 2002)

I-2 Intensité lumineuse :

L'intensité lumineuse est le flux lumineux émis par unité d'angle solide¹ dans une direction donnée.

Symbole : I

Unité de mesure : cd Candela², équivalent à 1 lm (lumen)/sr (stéradian³).

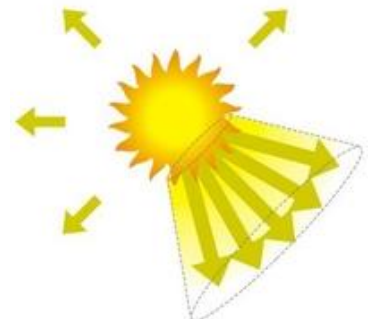


Figure 2 Intensité lumineuse
(source : A.DE HERBER 2002)

I-3 Eclairement :

L'éclairement décrit la densité du flux lumineux en un point d'une surface. Il diminue avec le carré de la distance.

Symbole : E

Unité de mesure : Lux (lx)

Le Lux équivaut à l'éclairement d'une surface de 1 mètre carré recevant un flux lumineux uniformément réparti de 1 Lumen.



Figure 3 Eclairement (source :
A. DE HERBER 2002)

¹ L'angle solide L'angle solide Ω d'un cône de sommet A est numériquement égal à l'aire de la calotte sphérique S_c découpée par ce cône sur la sphère de centre A et de rayon unité.

² Une candela correspond à peu près à l'éclairement d'une bougie

³ Stéradian : est l'unité de mesure de l'angle solide

I-4 Luminance :

La luminance d'une source est le rapport entre l'intensité lumineuse (nombre de candela) émise dans une direction et la surface (m^2) apparente de la source lumineuse dans la direction considérée.

Symbole : L.

Unité : candela par m^2 (Cd/m^2).



Figure 4 Luminance
(source : A.DE HERBER 2002)

VI-Sources de lumière :

On appelle une source lumineuse, tout corps émetteur de rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde sont comprises à l'intérieur du spectre visible, qui s'étend de 380nm à 780nm.

On en distingue essentiellement deux grandes catégories, les sources primaires ou directes, et les sources secondaires ou indirectes :

- On appelle source primaire, toute source qui produit de la lumière. Elle est visible, même isolée de toute autre source lumineuse. On distingue 3 familles :

- les sources primaires naturelles : le Soleil, les étoiles, la lave, le feu...
- les sources primaires artificielles : les appareils d'éclairages....
- les sources primaires animales : les lucioles, les verts luisants...

- On appelle source secondaire ou **objet diffusant**, tout objet qui renvoie de la lumière. Un objet diffusant n'est donc visible que s'il est éclairé par une autre source. La Lune, les planètes, les murs des bâtiments, un écran de cinéma, etc. sont des objets diffusants.

II-1 Les rayonnements électromagnétiques :

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique.

Les rayonnements électromagnétiques se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite. Ils se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde.

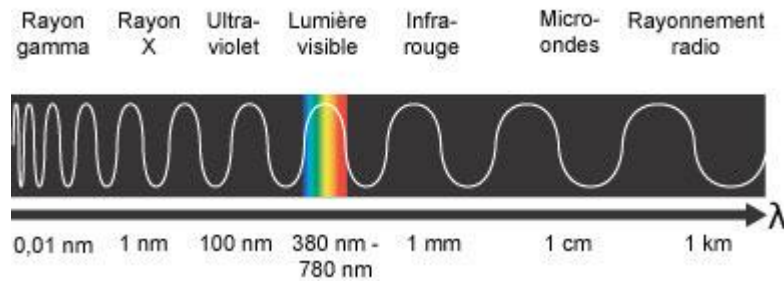


Figure 5 Spectre entier émis par le soleil (Source : <http://www.lumiere-spectacle.org/>)

II-2 le soleil source principale :

Le soleil est une boule de gaz incandescents qui émet lumière et chaleur radiante. La lumière solaire est blanche. Son spectre est complet et continu ; il est composé de radiation de longueurs d'onde allant de 0.3 à 2.6 microns (le maximum du spectre de la lumière solaire coïncide avec le maximum de la courbe des sensibilités de l'œil, radiations vert-jaune de longueurs d'onde 0.55 micron)

Son indice de rendu des couleurs (IRC) optimal est de 100 ; sur une échelle allant de 0 à 100. La lumière solaire varie de manière continue la journée en intensité de flux lumineux comme en direction, ainsi qu'au rythme de rotation de la terre autour du soleil, les saisons résultant de son inclinaison. Lorsque le nord est plus proche du soleil que le sud, c'est l'été dans l'hémisphère nord et l'hiver dans l'hémisphère sud. Dans les régions de l'équateur, le jour et la nuit sont d'égale longueur (R. NARBONI 2006).

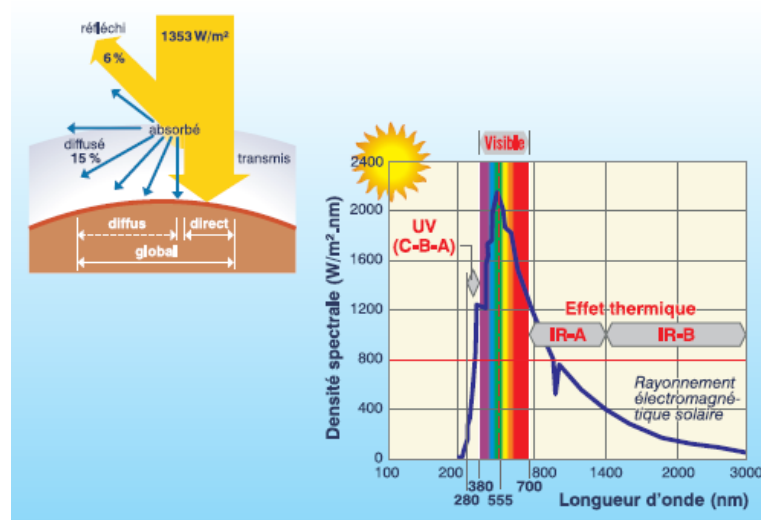


Figure 6 Le spectre solaire (source : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique. (A. Liébard et A. De Herde, 2005).)

Le spectre le solaire se répartit selon trois types de rayonnement :

- Les ultraviolets (UVA et UVB) qui ont une longueur d'onde comprise entre 280 et 380 nm. Ils représentent environ 5 % de la quantité totale du rayonnement solaire.
- la partie visible du spectre. Il s'agit de la partie du rayonnement solaire compris entre 380 et 780 nm. C'est dans ce domaine visible que l'énergie solaire est la plus intense. Elle représente 50 % de la quantité totale du rayonnement solaire.

Les infrarouges (IRA et IRB) qui correspondent aux longueurs d'ondes comprises entre 700 et 2 500 nm. Ils représentent environ 45 % du spectre solaire% (A.LIEBARD et A De HERDE, 2005).

II-3 le ciel source secondaire :

La partie du rayonnement solaire qui est absorbée et réémise par l'atmosphère constitue ce qu'on appelle l'éclairage provenant du ciel.

La disponibilité de la lumière naturelle dépend de la position du soleil dans le ciel définie par l'heure et la position géographique du lieu considéré - mais aussi des conditions météorologiques (couverture nuageuse), du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface...

Vu la multitude de conditions météorologiques existantes, des ciels standards ont été établis pour les études d'éclairage naturel. Chacun de ces ciels est caractérisé par la répartition de sa luminance sur la voûte céleste.

- ***Le ciel uniforme***

C'est le modèle le plus simple. Sa luminance est indépendante des paramètres géométriques : elle est constante en tout point du ciel à un moment donné. Cette situation correspond à un ciel couvert d'une couche épaisse de nuages laiteux ou à une atmosphère, pleine de poussières, dans lequel le soleil n'est pas visible.



Figure 7 Ciel uniforme
(source : A.DE HERBER 2002)

- **Le ciel standardisé**

Ciel couvert établi par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), pour lequel la luminance en un point varie en fonction de sa position sur la voûte céleste, suivant la loi :

$$L = L_z \frac{1+2 \sin \theta}{3}$$

Où L_z représente la luminance au zénith et θ la hauteur de la zone du ciel considérée. La luminance au zénith est donc trois fois plus élevée que la luminance de l'horizon. Ce modèle correspond à un ciel de nuages clairs cachant le soleil. Dans ce cas, la symétrie autour de la direction zénithale indique que l'orientation d'une baie verticale est sans effet sur le niveau d'éclairement intérieur.



Figure 8 Ciel court CIE
(source : A.DE HERBER 2002)

- **Le ciel clair**

Les valeurs de luminance varient en fonction de paramètres géométriques et de la position du soleil. Le ciel clair émet un rayonnement diffus qui dépend de la variation de la position du soleil, mais n'intègre pas le rayonnement solaire direct. Ce modèle simule la composante diffuse de l'éclairement d'un ciel serein.



Figure 9 Ciel clair
(source : A.DE HERBER 2002)

- **Le ciel clair avec soleil**

Les trois modèles précédents ne font intervenir que la composante diffuse du rayonnement solaire, le ciel clair avec soleil prend en compte son rayonnement global, c'est-à-dire la somme des rayonnements directs et diffus. Ce quatrième type de ciel correspond à un ciel serein au sein duquel le soleil brille. Le ciel clair avec soleil offre la possibilité d'étudier les jeux d'ombres et de lumière ainsi que les risques d'éblouissement dus à la pénétration du soleil dans un bâtiment.



Figure 10 Ciel claire avec soleil
(source : A.DE HERBER 2002)

Pour étudier l'éclairement à l'intérieur d'un bâtiment et pour arriver à des résultats exactes, la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) propose de prendre comme base de calcul un ciel couvert, car sa luminance est égale en tout point du ciel à un moment donné donnant un niveau d'éclairement de 5000 lux sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé (M.DERIBERE et P.CHAUVEL, 1968).

II-4 Le facteur de lumière du jour (FLJ) :

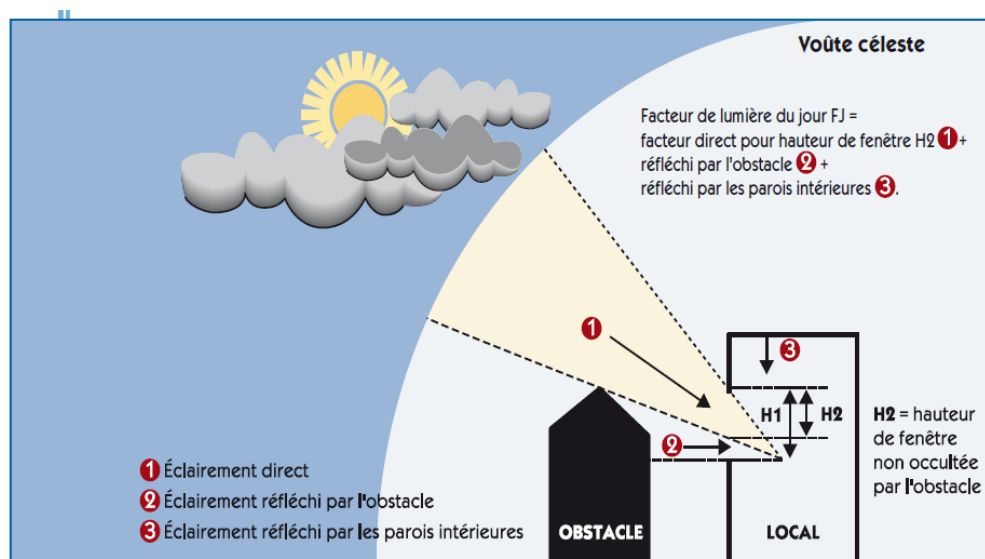


Figure 11 Les composants du facteur de lumière du jour SOURCE (INRS⁴, 2012)

En éclairage naturel, l'exigence d'éclairement peut se traduire en valeur de "facteur de lumière du jour" (FLJ).

Ce facteur est le rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point (généralement le plan de travail ou le niveau du sol) à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale, en site parfaitement dégagé, par ciel couvert. Il s'exprime en % (A.LIEBARD et A.De HERDE 2005).

Dans les conditions de ciel couvert (ciel normalisé par la Commission Internationale de l'Eclairage), les valeurs du facteur de lumière du jour sont indépendantes de l'orientation des baies vitrées, de la saison et de l'heure du jour.

Ceci étant, une fois qu'on connaît le facteur de lumière du jour en un point d'un local, on peut calculer l'éclairement atteint en ce point, à n'importe quel moment de l'année, sous des conditions de ciel couvert, à partir de l'éclairement horizontal extérieur.

⁴ Institut de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

FLJ	- de 1 %	1 à 2 %	2 à 4 %	4 à 7 %	7 à 12 %	+ de 12%
	Très faible	Faible	Modéré	Moyen	Elevé	Très élevé
Zone considérée	Zone éloignée des fenêtres (distance ~ 3 à 4 fois la hauteur des fenêtres)			A proximité des fenêtres ou sous des lanternaux		
Impression de clarté	Sombre à peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local	La zone à FLJ ≈ 1% semble être séparée de la zone à FLJ ≈ 12 %					
Ambiance	Le local semble être refermé sur lui-même			Le local s'ouvre sur l'extérieur		

Table 1 l'impression visuelle ressentie en fonction de la valeur du FLJ mesurée (<http://www.hqe.guidenr.fr/>)

En dessous de 1%, les conditions ne sont pas favorables pour un poste de travail

Au-dessus de 7%, les risques d'éblouissement sont importants.

VII- Appareil d'éclairage⁵ :

Un appareil d'éclairage se compose de plusieurs éléments :

- la source lumineuse (la lampe) ;
- les auxiliaires (suivant la nature de la lampe) ;
- le corps du luminaire.

III-1 Caractéristiques des lampes :

Les différents paramètres qui permettent de juger de la qualité d'une lampe sont :

- L'efficacité lumineuse ;
- La température de couleur ;
- L'indice de rendu des couleurs ;
- La durée de vie.

Habituellement une étiquette énergie figure sur l'emballage des lampes. Elle mentionne l'efficacité de la lampe par un code couleur et une lettre : 'A' est la plus efficace et 'G' la moins efficace.

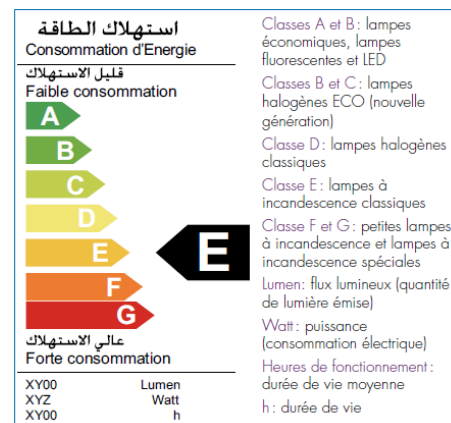


Figure 12 Etiquette énergie (Manuel technique de l'éclairage, (ADEREE))

⁵ Manuel technique de l'éclairage, (ADEREE) Agence Nationale pour le Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique.

Cette étiquette doit aussi indiquer le flux lumineux et la puissance de la lampe. La durée de vie peut aussi être stipulée à titre informatif.

III-1-1 L'efficacité lumineuse :

L'efficacité lumineuse est le rapport entre le flux lumineux émis par la lampe et la puissance électrique consommée.

L'unité d'efficacité lumineuse est le lumen/Watt (lm/W).

III-1-2 La température de couleur :

La température de couleur d'une source lumineuse est définie comme la couleur de la lumière émise et donc donne une indication sur l'ambiance lumineuse ainsi créée. Elle s'exprime en Kelvins (K) et correspond à la température à laquelle on devrait porter un corps noir pour qu'il émette une couleur identique à celle émise par la source.

On distingue :

- les couleurs froides (tirant vers le bleu) lorsque la température de couleur est élevée, supérieure à 5 000 K.

- les couleurs chaudes (tirant vers le rouge orange) lorsque cette température est inférieure à 3 300 K.

Sur les tubes fluorescents et les lampes fluocompactes on peut trouver la mention cool white/lumière du jour, qui correspond approximativement à 4 000 K, ou warm white/blanc chaud, qui correspond approximativement à 3 000 K.

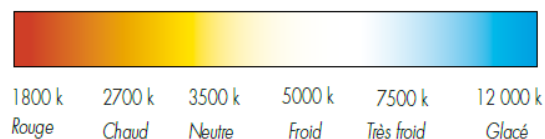


Figure 13 Température de couleur Manuel technique de l'éclairage, (ADEREE))

III-1-3 L'indice de rendu des couleurs (IRC ou Ra) :

L'indice de rendu des couleurs (IRC ou Ra) : c'est la capacité d'une lampe à restituer correctement les couleurs présentes dans l'environnement (parois du local, objets, personnes, affiches, ...). L'IRC est compris entre 0 et 100, 100 étant l'IRC de la lumière naturelle qui restitue toutes les nuances de couleur et 0 étant l'absence de couleur reconnaissable. Une différence de 5 points sera perceptible pour l'œil humain.

III-1-4 La durée de vie :

Elle est définie comme de la durée de vie moyenne d'un lot de lampes : le nombre d'heures de fonctionnement de ces lampes avant que 50 % d'entre elles ne soient hors-service.

III-1-5 Tableau comparatif :

Le tableau suivant donne les caractéristiques des différentes lampes décrites ci-dessus :

Tableau 3 Comparaison des lampes							
	Puissance (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité lumineuse (lm/W)	Classe éner.	Température de couleur	IRC	Durée de vie (h)
Lampes à incandescence classique	25 - +100	200 - 1 900	5 - 19	E - G	2700	100	1 000
Lampes à incandescence halogènes	5 - 500	50 - 10 000	10 - 12 (30 pour les IRC)	B - G	3000	100	2000 - 5000
Tubes fluorescents	15 - 58	1300-5000	60 - 105	A	2700 - 6700	80 - 95	8 000 - 12 000
Lampes économiques ou lampes fluocompactes (CFL)	ballast intégré	3 - 23	100 - 6000	A	2700 - 6500	80 - 90	6000 - 10 000
	ballast externe	5 - +80					8 000 - 16 000
Diodes électroluminescentes (DEL)	0,007 - 15	1,5 - 400	20 - 30	B - D	2700 - 6500	50 - 80	5000 - 100 000

Tableau 2 Comparatif des caractéristiques de différentes lampes (Manuel technique de l'éclairage, (ADEREE)).

VIII- Le confort visuel :

IV-1 lumière et la vision :

Pour voir un objet, il faut que de la lumière pénètre dans l'œil. L'œil est donc un **récepteur de lumière**. Nous voyons le Soleil car il émet de la lumière qui entre directement dans nos yeux. Les objets éclairés que nous regardons reçoivent cette lumière et en renvoient une partie dans nos yeux. On dit qu'ils diffusent de la lumière.

IV-1-1-La vision :

L'œil fournit la majorité des informations sensorielles qui nous sont nécessaires à l'interaction avec l'environnement en interprétant le flux lumineux .

Un rayon lumineux, qui atteint notre œil, traverse successivement :

- la cornée, paroi transparente bombée,
- l'humeur aqueuse,
- la pupille, ouverture variable au centre de l'iris,
- le cristallin, lentille souple transparente,
- le corps vitré,

Avant de rencontrer la rétine, couche de cellules

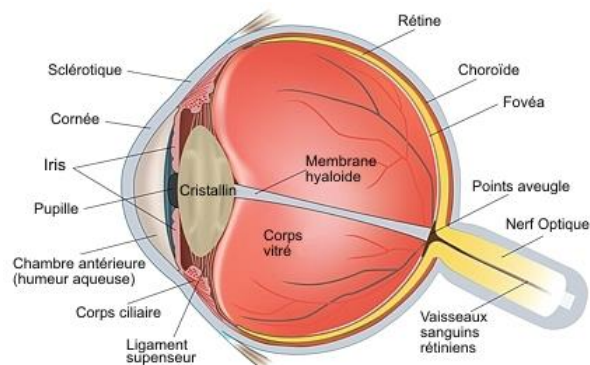


Figure 14 coupe sur l'œil humain (source: <http://www.drhay-ophtalmo.fr/>)

tapissant le globe oculaire.

La sensation de perception visuelle implique la pénétration d'un rayon lumineux, en provenance d'une source de lumière directe ou indirecte, dans le globe oculaire et son absorption par la rétine, partie photosensible de l'œil. Les récepteurs photosensibles de la rétine transforment alors l'énergie lumineuse en un influx nerveux, qui est acheminé par le nerf optique jusqu'au cerveau. Celui-ci procède à l'interprétation du signal reçu et reconstitue l'image d'origine.

Il faut distinguer trois zones sur la rétine : la fovéa, la macula et la périphérie.

Au centre de la rétine, à peu près dans l'axe optique, une région à structure plus fine présente un meilleur pouvoir de résolution : *la fovéa*.

Elle permet à l'individu moyen de voir avec une très grande précision. C'est la zone de la rétine où se situent la majorité des cellules de perception des couleurs.

Autour de la fovéa se trouve la macula. La vision maculaire est colorée et très claire mais elle n'est pas aussi aigüe que la vision fovéale, parce que la densité de cellules y est moindre. L'homme utilise en particulier la macula pour la lecture.

La périphérie permet de percevoir les mouvements sur les côtés quand le sujet regarde droit devant lui. La vision liée à la zone périphérique est beaucoup plus grossière et privilégie la perception du mouvement. C'est la vision d'alerte.

Le contrôle de la quantité de lumière admise sur la rétine est possible grâce à la pupille, ce diaphragme d'ouverture variable. La réaction de l'œil face au flux de lumière reçu se manifeste également par une lente adaptation de la sensibilité de la rétine.

Pour qu'une image se forme avec netteté sur la rétine, il faut que les rayons lumineux s'y focalisent. La cornée, dont la courbure est invariable, est en grande partie responsable de la déviation des rayons.

IV-1-2 La perception de l'intensité lumineuse

La rétine

La rétine a pour fonction de transformer l'information lumineuse en un signal électrique, transmis au cerveau par les fibres du nerf optique. Cette opération s'effectue selon une séquence en quatre temps : signal lumineux, réaction chimique, ionisation, signal électrique. En parvenant aux cellules de la rétine, les photons entraînent une modification des molécules de pigment qui s'y trouvent. Il s'en suit une cascade de réactions chimiques qui vont en s'amplifiant et aboutissent à une modification de la composition ionique de la cellule. Grâce à ces variations ioniques, le signal chimique devient signal électrique.

Les pigments qui réagissent à la lumière sont appelés photosensibles. A la différence d'une pellicule photographique, les réactions chimiques sont ici réversibles mais le retour à l'état initial n'est pas immédiat. En effet, lorsque nous fixons un objet lumineux, son image persiste un court instant après que nous ayons détourné le regard. A un degré plus élevé d'intensité lumineuse, de nombreuses cellules sont activées au même moment et donc incapables de percevoir d'autres images tant qu'elles ne sont pas revenues à leur état de repos : tel est le phénomène de l'éblouissement. L'œil humain possède un fonctionnement hybride car il s'adapte aux activités nocturnes comme aux diurnes.

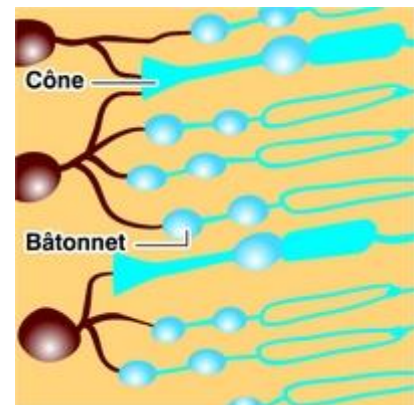


Figure 15 Les cellules réceptrices de la rétine : les cônes et les bâtonnets (source : <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/>)

La rétine comporte deux types de cellules réceptrices : les cônes (7 millions), principalement situés au centre, dans la zone de la fovéa, et les bâtonnets (120 millions), dominant en périphérie.

Le phénomène d'adaptation de l'œil dépend des luminances de départ et d'arrivée et de tout changement de brillance. Il est plus rapide lorsque la lumière est naturelle, ce qui met en évidence l'adéquation harmonieuse entre la lumière du jour et le système visuel. L'adaptation à l'obscurité prend plus de temps qu'à la lumière. L'œil nécessite environ 30 minutes pour s'adapter aux conditions extérieures d'obscurité au sortir d'une pièce de travail classique alors qu'il ne nécessite que quelques secondes pour s'adapter à la lumière en quittant un environnement obscur. L'adaptation complète de l'œil passant de la lumière du soleil à des luminances intérieures cent fois plus faibles, fournies par l'éclairage artificiel, demande environ 15 minutes, bien que 70% de l'adaptation soient réalisés après 90 secondes. Mais si l'espace intérieur est éclairé naturellement, l'adaptation est deux fois plus rapide.

IV-1-2 La sensibilité aux contrastes :

La sensibilité aux contrastes est l'aptitude à distinguer des différences de luminance. Sous des conditions d'éclairement pauvres, il peut être impossible de distinguer de faibles contrastes (M. BODART et A. DENEYER).

La présence de deux niveaux de luminance très différents, adjacents dans le champ visuel, est une source d'inconfort et diminue l'acuité visuelle.

Par effet de contraste, le rectangle intérieur de la figure ci-dessous paraît plus clair à l'extrême droite qu'à l'extrême gauche, alors qu'ils présentent tous la même couleur en réalité.

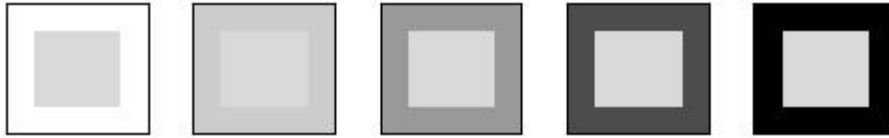


Figure 16 Perception d'un rectangle sous différents contrastes (Source : <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/>)

IV-1-3 La perception des distances

L'évolution des espèces, en ramenant les deux yeux de l'homme dans le plan frontal, lui a fait perdre une partie du périmètre du champ visuel vers l'arrière par rapport aux animaux qui possèdent des yeux latéraux. Cependant, si l'être humain est moins bien informé des proies et des prédateurs qui peuvent surgir derrière lui, il gagne un plus large secteur de superposition des deux yeux et donc de vision en trois dimensions. Or la perception du relief se révèle l'un des principaux facteurs qui concourent à notre évaluation des distances.

Grâce à la synthèse immédiate de toutes ces informations, nous situons en permanence l'éloignement des objets qui nous entourent, ou plutôt nous croyons les situer. En effet, le cerveau peut se tromper s'il est mis en présence de caractéristiques inhabituelles de dimensions ou de perspectives. La modification de certains paramètres, dont l'éclairage, peut également l'induire en erreur. Ainsi, dans un environnement obscur, un objet vivement éclairé paraît plus proche. Ces procédés sont bien connus en architecture.

IV-1-4 La distinction des couleurs

La courbe spectrale de sensibilité de l'œil montre qu'un flux lumineux de couleur bleu foncé ou rouge moyen reçu par une surface doit être fourni par une source lumineuse de puissance environ 20 fois plus importante qu'un flux lumineux de couleur verte ou jaune pour produire la même sensation de luminosité.

La vision des couleurs a pour base une très légère diffusion de la lumière dans l'œil humain. Les trois types de cônes sensibles à la couleur ne voient que leur partie du spectre. Selon les longueurs d'onde qui les frappent, les récepteurs de la rétine envoient des messages sensoriels différents au cerveau. Celui-ci analyse la proportion des radiations que chaque type de cône reçoit et la synthétise en une sensation colorée.

A la différence des cônes, les bâtonnets, qui entrent en jeu quand la luminance devient très faible, ne possèdent qu'un type de pigment et ne nous permettent plus de distinguer les couleurs. Un paysage qui offre de jour des teintes variées nous apparaît uniformément bleuté la nuit, avec seulement des variations d'intensité, bien qu'aucune des surfaces présentes n'ait changé de substance.

Simple dans son principe, le système est compliqué par l'interprétation qu'en fait le cerveau. S'il vient de percevoir une surface blanche ou un élément bleu, il maintiendra son jugement même si les conditions d'éclairage changent.

De plus, notre cerveau analyse la couleur d'un objet par rapport à celle des objets qui l'entourent.

IV-1-5 L'acuité visuelle

L'acuité visuelle indique la capacité de l'œil à distinguer de fins détails. Elle diminue avec le vieillissement de l'œil.

Une bonne visibilité d'un objet nécessite impérativement quatre conditions : une dimension minimale de l'objet à observer, un minimum de temps nécessaire à l'œil pour percevoir l'objet présenté, une luminance minimale et un minimum de contraste entre l'objet et l'environnement proche.

Jusqu'à un certain point, l'acuité visuelle est favorisée par une augmentation de la luminosité de la tâche visuelle. Une luminance minimale est nécessaire pour une bonne vision des éléments de petite dimension. Des objets qui peuvent être reconnus facilement et dont on peut distinguer aisément les détails peuvent devenir indistincts et même imperceptibles lorsqu'il fait plus sombre ou obscur.

IV-1-6 Le champ visuel

Le champ visuel est l'espace délimité par la perception spatiale de l'œil, sans bouger la tête. Bien que le champ visuel soit légèrement différent pour chaque individu, la portée verticale des yeux couvre un angle d'environ 130° ; elle est limitée vers le haut par les arcades sourcilières et vers le bas par les joues. Le champ horizontal total des yeux est d'environ 180° lorsqu'ils sont dirigés vers un objet fixe.

Chaque œil a un angle de vision d'environ 150°. A l'endroit où les champs visuels se recouvrent, l'homme a une vision binoculaire ; ils se superposent dans la zone médiane, où un

même objet est vu simultanément par les deux yeux mais sous un angle différent. C'est grâce au cerveau qui compare les images provenant de l'œil droit et de l'œil gauche que nous avons l'impression de relief.

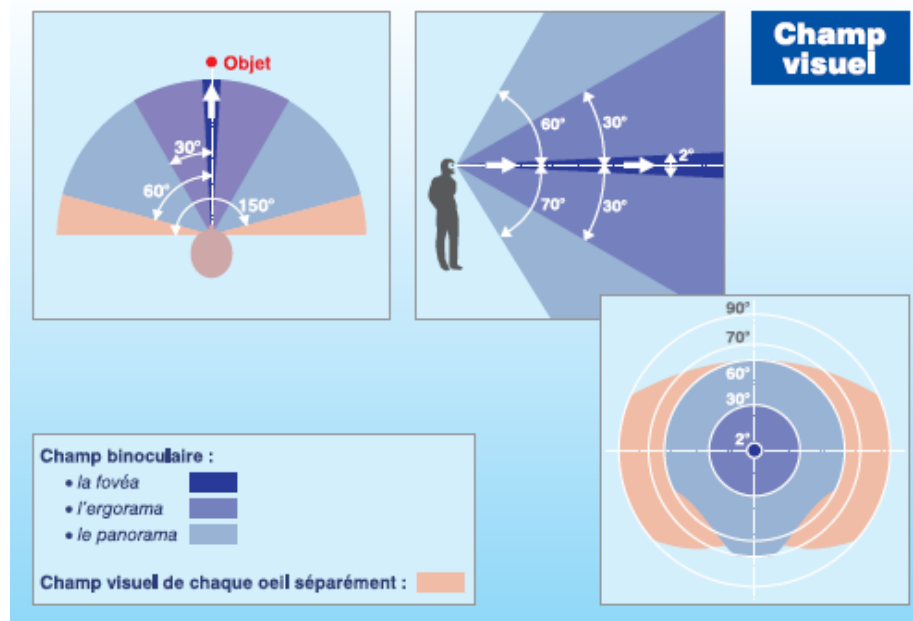


Figure 17 le Champ visuel (source : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique)

La capacité de l'œil à saisir une information visuelle dépend de sa position relative dans le champ visuel.

IV-1-7 L'influence du psychisme

Notre vision est également influencée par des facteurs d'ordre psychologique. Citons un phénomène : les muscles de la pupille réagissent à la lumière mais aussi aux images émotionnelles. La pupille se dilate face à un spectacle agréable et se contracte devant ce qui nous gêne ou nous déplaît.

Tant pour les couleurs que pour la distribution de l'espace, notre perception est soumise à des a priori. Nous n'analysons jamais une information isolément mais toujours en fonction du contexte et des expériences mémorisées antérieurement.

Chaque élément perçu par l'œil est porteur de sens, qu'on le veuille ou non. Les objets nous paraissent agréables ou laids ; ils constituent des signaux d'avertissement, des messages écrits ou symbolisés. Deux personnes qui décrivent un même bâtiment n'en font pas une description identique. Elles ne portent pas leur attention ni ne font le point sur les mêmes éléments ; elles n'interprètent pas les choses vues de la même manière, et cela bien souvent sans qu'elles puissent donner des raisons conscientes de leurs choix.

Les individus voient la réalité différemment selon leur culture, leur personnalité, leur état d'âme, leur âge, leurs expériences précédentes.

V-2 Les paramètres du confort visuel

Le confort visuel est une impression subjective liée à la quantité, à la distribution et à la qualité de la lumière (M.BODART, 2008).

L'environnement visuel procure une sensation de confort lorsqu'il est possible de voir les objets nettement et sans fatigue dans une ambiance colorée agréable. L'obtention d'un environnement visuel confortable dans un local favorise le bien-être des occupants. Par contre, un éclairage trop faible ou trop fort, mal réparti dans l'espace ou dont le spectre lumineux est mal adapté à la sensibilité de l'œil ou à la vision des couleurs, provoque à plus ou moins longue échéance une fatigue, voire même des troubles visuels, accompagnés d'une sensation d'inconfort et d'une performance visuelle réduite.

Le confort visuel dépend d'une combinaison de paramètres physiques : l'éclairage, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux, auxquels s'ajoutent des caractéristiques propres à l'environnement et à la tâche visuelle à accomplir, comme la taille des éléments à observer et le temps disponible pour la vision. Le confort visuel relève, en outre, de facteurs physiologiques et psychologiques liés à l'individu tels que son âge, son acuité visuelle ou la possibilité de regarder à l'extérieur.

Les paramètres du confort visuel pour lesquels l'architecte joue un rôle prépondérant sont :

- le niveau d'éclairage de la tâche visuelle ;
- un rendu des couleurs correct ;
- une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace ;
- les rapports de luminance présents dans le local ;
- l'absence d'ombres gênantes ;
- la mise en valeur du relief et du modelé des objets ;
- une vue vers l'extérieur ;
- une teinte de lumière agréable ;
- l'absence d'éblouissement.

Il est cependant très difficile de quantifier les valeurs idéales que ces paramètres devraient atteindre : il n'existe en effet pas de solution universelle au problème du confort visuel car

celui-ci sera influencé par le type de tâche, la configuration du lieu, et les différences individuelles. De plus, le jugement de la qualité de la lumière sera influencé par des aspects personnels, culturels et historiques.

V-2-1- Le niveau d'éclairement

Un niveau d'éclairement minimum est nécessaire pour une vision claire et sans fatigue. Toutefois, un éclairement trop abondant peut être inconfortable.

L'éclairement moyen recommandé est généralement fixé selon la fonctionnalité du local et la précision de la tâche visuelle qui doit y être exercée. Les recommandations sont souvent données en termes d'éclairement, plutôt que de luminance, pour la facilité de sa mesure.

Comme la sensation de luminosité est mieux représentée par la luminance, il faut tenir compte du coefficient de réflexion dans le choix de l'éclairement d'une surface. Plus il est faible, ou sa couleur foncée, plus la vision s'avère difficile et plus le niveau d'éclairement doit être élevé.

De plus, les niveaux d'éclairement conseillés doivent être nuancés en fonction du contraste de luminance entre l'élément observé et son arrière-fond.

Les valeurs de l'éclairement E (lux) recommandées dans le tableau ci-dessous sont fondées sur les expériences réalisées dans la pratique. Elles sont valables d'une manière générale. Les valeurs pour des activités sont définies directives de des tâches et spécifiques dans les l'USL⁶.



E [lx]	Genre de travail ou de local
≥ 1	Eclairage de secours pour voies d'évacuation
≥ 50	Locaux de travail sans activité manuelle
≥ 100	Locaux de travail avec activité manuelle occasionnelle
≥ 200	Locaux de travail avec postes de travail permanents sans exigences particulières
≥ 300	Locaux de travail pour activités de précision moyenne nécessitant une visibilité simple
300 - 500	Locaux avec travail à l'écran
≥ 1 000	Eclairage local avec éclairage général supplémentaire pour activités très complexes nécessitant une très bonne visibilité

⁶ L'Union Suisse pour la Lumière

V-2-2 Un rendu des couleurs correct :

Le rendu des couleurs est un critère de qualité important de la lumière. Une source lumineuse dont la lumière contient toutes les couleurs du spectre, par ex. la lumière du soleil, permet aux couleurs des objets éclairés de sembler naturelles. Selon le lieu d'application et les tâches visuelles, la lumière artificielle doit garantir la perception des couleurs la plus correcte possible (comme avec la lumière naturelle). Pour cela, les propriétés du rendu des couleurs d'une source lumineuse exprimées par paliers dans « l'index général du rendu des couleurs » servent d'échelle. Une source lumineuse avec $R_a = 100$ montre toutes les couleurs de manière optimale. Plus la valeur R_a est faible, moins la couleur est bien rendue.

L'ambiance d'un local prévue initialement peut être altérée par les couleurs utilisées. C'est la raison pour laquelle les couleurs vives, pour de grandes surfaces, doivent être utilisées avec précaution. Pour un éclairage de faible intensité, il faut choisir des couleurs chaudes. Un éclairage de couleur blanche du type lumière du jour requiert une intensité élevée.

V-2-3 La répartition de la lumière :

La répartition lumineuse ou l'uniformité des niveaux d'éclairage caractérise les variations du niveau d'éclairage et est définie comme étant le rapport entre l'éclairage minimum et l'éclairage moyen observé dans la zone de travail.

Pour permettre à la lumière naturelle de se distribuer le mieux possible dans le local, il est essentiel de placer le mobilier de telle sorte qu'il ne fasse pas écran et de disposer les zones d'activité judicieusement. Les plans de travail seront situés préférentiellement près des ouvertures où la lumière naturelle est bien reçue.

V-2-4 Les rapports de luminance :

La distribution lumineuse d'un espace doit être telle que les différences excessives de luminance soient évitées pour permettre aux occupants de voir correctement. Des zones extrêmement sombres ou brillantes donnent naissance à l'inconfort visuel et doivent être évitées.

⁷ La Commission universitaire pour la santé et la sécurité au travail romande c'est un groupe de travail, comprenant les différentes personnes en charge de la sécurité dans les Universités romandes.

Lorsqu'il y a de grandes différences de luminance dans le champ visuel, l'œil doit s'adapter lorsque la direction du regard change. Pendant son adaptation, l'acuité visuelle est diminuée. Pour éviter de telles fatigues inutiles, il convient de ne pas dépasser certaines valeurs de contraste entre les différentes zones du champ visuel. Cependant, si les différences entre les niveaux de luminance sont trop faibles, on crée dans le local une impression de monotonie très désagréable.

La perception des détails d'une tâche visuelle est facilitée par les contrastes de luminance et de couleur entre ces détails et l'arrière-fond. De plus, un contraste suffisant devrait être appliqué pour favoriser la perception du relief des objets. Il s'agit donc de trouver un compromis entre ces exigences.

V-2-5-Les ombres gênantes :

Les ombres qui sont créées par la présence d'un élément entre la tâche visuelle et la source lumineuse sont mauvaises pour la vision puisqu'elles diminuent fortement les contrastes. Le travail de lecture ou d'écriture ne peut être perturbé par des ombres parasites. Il faut donc éviter les situations suivantes :

- un éclairage latéral venant de droite pour les droitiers ;
- un éclairage latéral venant de gauche pour les gauchers ;
- un éclairage provenant du dos des occupants.

V-2-6 La relation au monde extérieur :

L'éclairage naturel est préféré à l'éclairage artificiel pour sa variabilité et ses nuances. La variabilité de la lumière naturelle permet d'établir une harmonie avec le monde extérieur et crée une ambiance intérieure plus chaleureuse. Son caractère cyclique est un facteur important pour notre équilibre psychique. La lumière naturelle est un élément indispensable pour une bonne perception de l'instant et du lieu où nous évoluons.

Les baies vitrées, par lesquelles la lumière naturelle pénètre, offrent le double avantage d'une communication visuelle vers l'extérieur et d'une vue au loin nécessaire au repos de l'œil après une vision rapprochée.

V-2-7 Une teinte de lumière agréable :

La perception des couleurs varie d'une personne à l'autre. Elle est totalement dépendante de la sensibilité de l'œil, qui est fonction de la longueur d'onde du rayonnement visible perçu.

Une source lumineuse aura un bon rendu des couleurs dans la mesure où elle émet des radiations proches des sensibilités maximales des yeux aux couleurs, situées vers 450 nm pour le bleu, 540 nm pour le vert et 610 nm pour le rouge. Vu que la couleur de la lumière influence directement notre perception de la couleur des objets, elle agit fortement sur la sensation de confort visuel qui lui est associée. Les radiations colorées émises par les objets de l'environnement peuvent produire certains effets psycho-physiologiques sur le système nerveux.

Les couleurs de grande longueur d'onde ont un effet stimulant tandis que celles de courte longueur d'onde ont un effet calmant. Les couleurs intermédiaires (jaune, vert) procurent, de même que le blanc, un effet tonique et favorable à la concentration. Les couleurs foncées et le gris ont par contre une action déprimante.

En outre, les couleurs peuvent contribuer dans une large mesure à modifier la dimension apparente des surfaces et des volumes. Les couleurs chaudes seront de préférence utilisées dans des locaux de dimensions exagérées tandis que les couleurs froides seront choisies pour les locaux de dimensions réduites.

Il est déconseillé d'utiliser simultanément des teintes froides et des couleurs chaudes, ce qui gêne l'adaptation de l'œil et crée des perturbations visuelles. Pour les locaux éclairés en grande partie par la lumière naturelle, il est donc préférable de choisir des luminaires de température de couleur élevée afin d'éviter de trop grandes différences entre les éclairages artificiel et naturel.

Une harmonisation entre la couleur des sources lumineuses et l'aménagement du local s'impose. Les objets de couleurs chaudes (rouge, orange) sont plus agréables lorsqu'ils sont éclairés par une lumière chaude plutôt que par une lumière froide mais, par contre, la lumière chaude tend à noircir les couleurs froides (bleu, violet).



Figure 19 L'évolution du spectre lumineux de la lumière naturelle modifie l'aspect d'un bâtiment (Opéra de Sydney arch. J. Utzon)

La couleur de la lumière doit être adaptée au niveau d'éclairement. Quand le niveau d'éclairement augmente, la température de couleur de la lumière doit également s'élever. Le diagramme de Kruithof donne à cet effet les valeurs recommandées de la température de couleur en fonction de l'éclairement. Seule la zone B correspond à la zone de confort. Si quelqu'un se trouve dans la zone A, l'impression visuelle correspond à une ambiance lumineuse irréaliste, trop chaude ; la température de couleur est trop faible pour le niveau d'éclairement considéré. Dans la zone C, l'ambiance lumineuse, de type crépusculaire, est trop froide ; la température de couleur de la source est trop importante par rapport au niveau d'éclairement atteint.

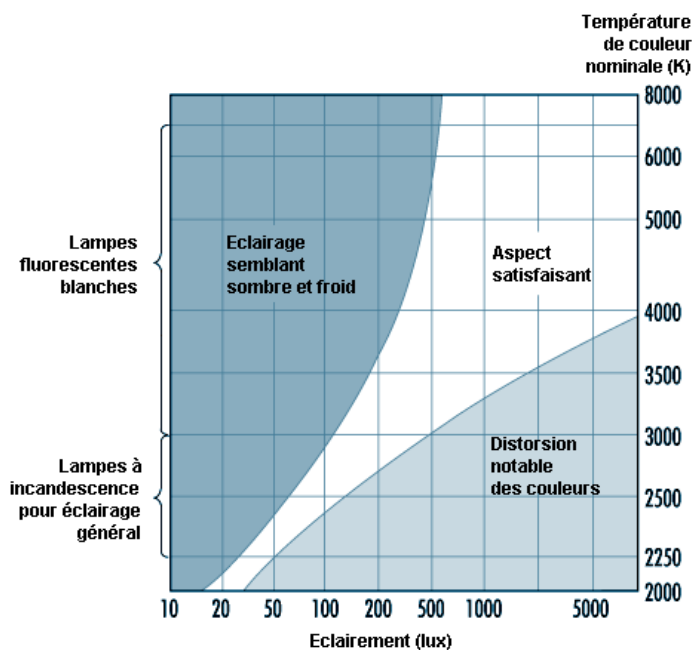


Figure 20 Diagramme de confort en fonction de l'éclairement et des températures de couleurs (Source: <http://www.ilocis.org>)

L'utilisation de sources lumineuses dont la température de couleur est très élevée a une influence favorable sur l'ambiance lumineuse d'un local et sur les conditions de vision, élargissant ainsi la zone d'impression agréable limitée par les courbes de Kruithof.

VI- L'éblouissement.

Selon la définition de l'AFE⁸, l'éblouissement correspond aux «conditions de vision dans lesquelles on éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer de petits objets, par suite d'une réapparition favorable des luminances ou contraste excessif»

⁸ Association Française de l'Eclairage

L'éblouissement résulte de conditions de vision dans lesquelles l'individu est moins apte à percevoir les objets, suite à des luminances ou à des contrastes de luminance excessifs dans l'espace et dans le temps.

L'éblouissement est dû à une luminosité trop intense de surfaces placées dans la direction de la vision ou à un contraste lumineux trop important entre surfaces contiguës. Il place l'individu dans des situations de grand inconfort visuel.

VI-1 L'éblouissement direct et l'éblouissement indirect

L'éblouissement direct est causé par la présence d'une source lumineuse intense dans le champ de vision. Comme la partie fovéale de l'œil est très sensible à de hauts niveaux de luminance, il existe une différence considérable entre les luminances maximales acceptées par l'œil au centre du champ de vision et en périphérie. Les valeurs de luminance maximales admissibles dépendent donc de l'angle de vision. En effet, lorsque l'angle formé par l'horizontale et la droite qui relie l'œil à la source lumineuse augmente, la sensation d'éblouissement diminue.

L'éblouissement indirect provient d'une réflexion perturbatrice des sources lumineuses sur des surfaces spéculaires ou brillantes telles que le papier, une table ou un écran d'ordinateur.

L'éblouissement indirect se présente sous deux formes : l'éblouissement par réflexion et l'éblouissement par effet de voile

- L'éblouissement réfléchi est produit par la réflexion, sur des surfaces brillantes ou spéculaires, de l'image d'une source de lumière vers l'œil de l'observateur.
- L'éblouissement de voile apparaît lorsque des petites surfaces de la tâche visuelle réfléchissent la lumière provenant d'une source lumineuse et réduisent ainsi le contraste entre la tâche visuelle et son environnement immédiat.

VI-2 L'éblouissement perturbateur et l'éblouissement invalidant

L'éblouissement est classé en deux types selon son degré d'intensité, à savoir l'éblouissement perturbateur (ou d'inconfort) et l'éblouissement aveuglant (ou invalidant).

L'éblouissement perturbateur diminue la capacité de l'observateur à distinguer les détails. Si un objet lumineux est placé dans l'axe de la vision de quelqu'un, son œil doit

constamment s'ajuster entre la luminance de l'objet lumineux et celle de la tâche visuelle à accomplir, au détriment de la perception des détails. Ce type d'éblouissement peut à la longue entraîner une fatigue.

L'éblouissement aveuglant est tellement intense que l'observateur ne peut plus discerner aucun objet pendant un certain temps.

A intensité égale, la sensation d'éblouissement produite par une source lumineuse soudaine se révèle plus forte et plus prolongée lorsque la luminosité ambiante est faible. Ainsi, la nuit, nous sommes plus aveuglés par les phares d'une voiture en rase campagne qu'au centre d'une ville.

En outre, la sensibilité à l'éblouissement est aggravée par des anomalies oculaires, comme la myopie, ou par des facteurs temporaires.

VI-3 L'éblouissement dû à l'éclairage naturel

En éclairage naturel, les sources principales d'éblouissement sont :

- La vision directe du soleil ou du ciel au travers des fenêtres,
- La réflexion du soleil ou du ciel sur les bâtiments voisins,
- Un contraste de luminance excessif entre une fenêtre et le mur dans lequel elle s'inscrit,
- Un contraste de luminance excessif entre une fenêtre et son châssis,
- Une surface de luminance trop élevée par rapport aux surfaces voisines.

VI-4 Cas particulier des écrans d'ordinateurs :

Dans le cas particulier des écrans d'ordinateur, il convient de tenir compte des points suivants

- Aucune fenêtre ne doit se trouver devant ou derrière l'écran.
- L'axe principal du regard doit être parallèle aux fenêtres.
- Les fenêtres doivent être équipées de protections solaires efficaces sur le plan visuel sur toutes les façades. Il est recommandé d'en confier la gestion aux occupants eux-mêmes.
- Les surfaces voisines de l'écran devraient être mates et avoir un facteur de réflexion de 0,2 à 0,5.

- La luminance de chaque partie de l'environnement que l'observateur peut voir par réflexion dans son écran doit être aussi uniforme et faible que possible.
- Pour réduire la différence de luminance entre l'écran et le ciel, il peut être utile de placer une rangée de luminaires le long de la fenêtre.
- Les réflexions sont plus perturbatrices sur écran à fond sombre que sur écran à fond clair. Si toutes les autres mesures ont échoué, il faut installer des écrans antireflets, bien qu'ils ne soient pas généralement recommandés parce qu'ils réduisent la visibilité des images.



Figure 21 Différentes positions possibles d'un écran par rapport à une ouverture à la lumière naturelle. (Source B. MAGALI et D.ARNAUD)

Seule la première configuration est optimale car elle permet de réduire le contraste de luminance dans le champ visuel de l'utilisateur (écran, fond).

L'éblouissement est une source importante de gêne pour l'œil humain, qui peut occasionner une perte momentanée ou durable de tout ou partie du vision. Ce phénomène est dû aux cellules de la rétine, photosensibles, qui réagissent en grand nombre à un haut degré d'intensité lumineuse et sont donc incapables de percevoir d'autre image tant qu'elles ne sont pas revenues à leur état de repos.

Conclusion

Dans ce présent nous retenons que l'obtention du confort visuel dans un local de travail est subordonné a de nombreux facteurs tel que le niveau d'éclairement, l'indice de rendu des couleurs, la répartition de la lumière la relation au monde extérieur ...etc.

Les objets à percevoir doivent avoir une dimension minimale. Sous les mêmes conditions d'éclairage, un texte peut être parfaitement lisible s'il est suffisamment grand alors qu'un texte écrit en petits caractères deviendra plus difficile à lire.

L'œil humain a besoin d'un minimum de temps pour percevoir un objet présenté. Un objet qui se déplace trop vite est invisible. Ainsi, il est impossible de suivre la trajectoire d'une balle de revolver, son mouvement étant trop rapide.

Jusqu'à un certain point, l'acuité visuelle est favorisée par une augmentation de la luminosité de la tâche visuelle. Une luminance minimale est nécessaire pour une bonne vision des éléments de petite dimension. Des objets qui peuvent être reconnus facilement et dont on peut distinguer aisément les détails peuvent devenir indistincts et même imperceptibles lorsqu'il fait plus sombre ou obscur.

Pour voir clairement un objet, il faut un minimum de contraste de luminance ou de couleur entre l'objet et son environnement proche.

Il est cependant très difficile de quantifier les valeurs idéales que ces paramètres devraient atteindre : il n'existe en effet pas de solution universelle au problème du confort visuel car celui-ci sera influencé par le type de tâche, la configuration du lieu, et les différences individuelles. De plus, le jugement de la qualité de la lumière sera influencé par des aspects personnels, culturels et historiques.

La vision humaine est un processus très complexe qui n'est pas encore totalement compris aujourd'hui, malgré des centaines d'années d'études et de modélisation. Le processus de vision expliqué précédemment.

La lumière naturelle est l'un des éléments dont l'homme a toujours perçus fortement le besoin et l'impact sur ses activités. Elle influence le bien-être psychosomatique des occupants d'un local.

Chapitre 2

Les stratégies de la lumière naturelle

II- les stratégies de la lumière naturelle :

Toute réalisation architecturale concrétise un microcosme en rapport plus ou moins étroit avec l'environnement auquel 'il appartient. Il est important de concevoir un édifice en concordance optimale avec leur environnement et tirer le meilleur parti possible de la lumière naturelle.

La stratégie de la lumière naturelle est l'étude de la relation entre la lumière naturelle et le bâtiment. Elle permet d'offrir un confort visuel aux occupants et de réduire la consommation d'énergie des bâtiments (A.DE HERBER, 2002).

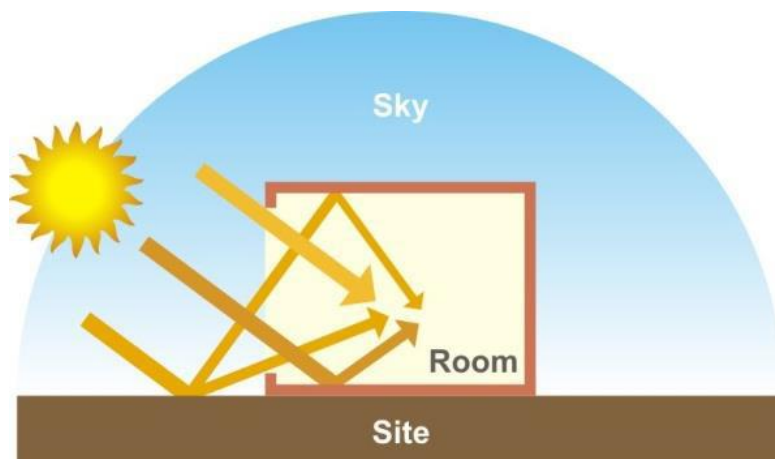


Figure 22 stratégie de l'éclairage naturel (Source : UCL - Architecture et Climat)

I-1 Capter :

Capter la lumière du jour consiste à la recueillir pour éclairer naturellement un bâtiment.

La lumière naturelle n'est ni fixe ni toujours égale dans sa qualité et son intensité. Elle dépend d'abord de la localisation choisie, c'est-à-dire de la latitude et de l'altitude du site considéré ainsi que de la pollution de l'air à cet endroit. Pour un

bâtiment d'implantation déterminée, la quantité de lumière naturelle disponible est fonction :

- ***Du type de ciel***

La lumière naturelle traduit fluctuation de l'état du ciel. Elle est composée de la lumière directe du soleil et de la lumière diffuse du ciel. Les stratégies à mettre en place pour accroître la luminosité intérieure d'un édifice doivent tenir compte de cette différence.



Figure 23 Puit de lumière
(Source B, PAULE 2007)

La lumière solaire directe dispense un flux considérable qui s'avère facile à capter et à diriger. Par contre le rayonnement solaire direct est souvent une source d'éblouissement et parfois de surchauffe du bâtiment. De plus, sa disponibilité est épisodique et dépend de l'orientation des ouvertures.

La lumière diffuse du ciel est disponible dans toutes les directions. Elle suscite peu d'éblouissement et ne provoque pas de surchauffe mais elle peut être considérée comme insuffisante dans de nombreux cas. En outre, elle crée peu d'ombre et de très faibles contrastes.

- ***Du moment de l'année :***

De l'été à l'hiver, le rayonnement solaire direct pénètre plus en profondeur dans le local mais le niveau d'éclairement à proximité de la fenêtre diminue progressivement.

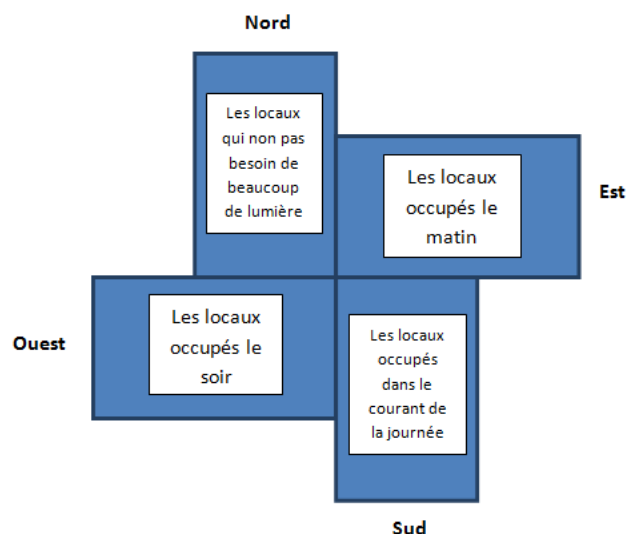
- ***De l'heure :***

Par ciel clair avec soleil, la répartition lumière varie fortement d'une heure à l'autre et d'un point à l'autre du local.

La lumière disponible augmente jusqu'à la mi-journée, puis diminue. Le rayonnement solaire direct induit une tache de lumière qui évolue, au cours de la journée, depuis le mur ouest du local vers le mur est.

- ***De l'orientation de l'ouverture :***

L'organisation spatiale d'un bâtiment devrait toujours être pensée en fonction du moment d'occupation des locaux, de l'activité qui s'y déroule et de la course du soleil. Il est préférable de placer les fenêtres de telle façon que le soleil puisse pénétrer à l'intérieur d'un local au moment où il est le plus utilisé



Les ouvertures orientées au sud offrent donc la meilleure situation puisqu'elles captent un maximum de rayons solaires en hiver et durant l'entre-saison qu'en été il est plus facile de se protéger du soleil au sud puisqu'il est plus haut dans le ciel. Une orientation adaptée aux contraintes du bâtiment permet de réduire la consommation de chauffage et d'éclairage de ce dernier.

- ***De l'inclinaison de l'ouverture***

Pour capter le maximum de rayonnement solaire direct, une ouverture doit être la plus perpendiculaire possible aux rayons solaires. En revanche, par ciel couvert, les performances d'une fenêtre sont avant tout liées à la portion de ciel visible depuis l'ouverture. Ainsi, une ouverture horizontale couvre une partie de ciel plus importante qu'une fenêtre verticale et apporte donc une plus grande part de lumière naturelle diffuse dans le local qu'elle éclaire.

Les fenêtres sur façade sud transmettent un maximum de rayons solaires. La lumière pénètre latéralement dans les locaux, ce qui peut créer des situations de contre-jour ou d'éblouissement à proximité des fenêtres

Les ouvertures zénithales : s'ouvrent sur la totalité de la voûte céleste ; elles induisent une large pénétration de lumière diffuse. De plus, la lumière entre dans les locaux par le plafond, ce qui limite à priori les phénomènes d'éblouissement. Par contre, par ciel serein, les ouvertures zénithales captent mal les rayons solaires d'hiver alors qu'elles laissent largement pénétrer le soleil d'été, ce qui implique un mauvais comportement thermique.

- ***De l'environnement physique de l'édifice :***

La lumière disponible dépend de l'environnement direct du bâtiment par le jeu de différents paramètres : le relief du terrain, les constructions voisines, le coefficient de réflexion du sol, la végétation, etc. Lors de la conception d'un bâtiment, il est donc important de mesurer l'impact de l'environnement existant sur le nouvel édifice afin de profiter au mieux des possibilités offertes par le terrain pour capter la lumière.

I-2 Transmettre :

Transmettre la lumière naturelle consiste à favoriser sa pénétration à l'intérieur d'un local. La pénétration de la lumière dans un espace est influencée par les caractéristiques de l'ouverture telle que ses dimensions, sa forme, sa position et le matériau de transmission utilisé, ainsi que par les dimensions du local et son aménagement intérieur.

I-2-1 Les caractéristiques de la fenêtre :

Les fenêtres sont amenées à jouer un rôle majeur dans le confort visuel et l'équilibre thermique des bâtiments. L'ouverture en façade est de loin le composant le plus employé pour transmettre la lumière naturelle dans les édifices. Il ne faut donc pas perdre de vue que les performances lumineuses d'un bâtiment sont principalement induites par les caractéristiques de ces fenêtres latérales. Leurs dimensions, leur forme et leur matériau dont elles sont constituées se révèlent donc des éléments essentiels pour la quantification et la qualification de la pénétration de la lumière dans un édifice.

- ***Les dimensions de l'ouverture :***

La taille des ouvertures est un élément déterminant de la quantité de lumière extérieure qui parvient à l'intérieur des locaux.

Pour maximiser les apports de lumière naturelle, on peut augmenter la prise de contact avec l'extérieur en créant des décrochements, des subdivisions, »etc.

L'indice d'ouverture représente le pourcentage de surface vitrée rapportée à la surface du local (B. PAULE ; 2007).

	Indice de profondeur	Indice d'Ouverture		
		Base	Performant	Très Performant
Chambres	< 2,6	16%	16%	30%
Séjours	< 3,0	16%	20%	30%
Cuisines	< 2,6	16%	25%	30%
Salles de Classe	< 3,5	20%	30%	35%
Bureaux	< 2,6	20%	30%	35%

Tableau 3 Indices d'ouverture et de profondeur en fonction du type de local,

- ***La forme de l'ouverture :***

Nous pouvons étudier l'influence de la forme de la fenêtre en comparant la répartition lumineuse fournie par une série de fenêtres de proportion différentes, pour une surface vitrée identique et une hauteur de l'allégé constante.

Lorsque la largeur de la fenêtre diminue, la répartition devient moins uniforme, bien que l'éclairement moyen soit pratiquement le même dans les tous les cas étudiés. Par contre, l'éclairement du fond du local augmente avec la hauteur de fenêtre.

Pour une même surface vitrée, une fenêtre haute éclaire mieux en profondeur. L'idéal réside donc dans une fenêtre horizontale et élevé.

Pour maximiser les apports de lumière naturelle, on peut également interrompre un faux plafond à proximité de la fenêtre pour favoriser la pénétration de la lumière naturelle par cette ouverture. Ce procédé est connu sous le nom de "plafond biaisé".

- ***La position de l'ouverture :***

L'emplacement de la fenêtre exerce une grande influence sur la pénétration de la lumière dans le local. Plus la fenêtre est élevée, mieux le fond du local est éclairé et plus la zone éclairée naturellement est profonde.

L'efficacité lumineuse d'une fenêtre est maximale au niveau d'un bandeau horizontal, situé en partie supérieure de la paroi.

Clerestory c'est une fenêtre dont le seuil se trouve au-dessus du niveau de l'œil

Une telle fenêtre en hauteur procure les avantages suivants :

- Une répartition très uniforme de la lumière dans l'espace ainsi qu'un bon éclairage du fond du local.
- Meilleur éclairage du fond du local
- Une source de lumière au-dessus de la ligne de vision, ce qui réduit les risques d'éblouissement direct.

Cependant, le seuil se trouve au-dessus du niveau de l'œil, la vue sur l'extérieur est impossible. La fenêtre ne peut jouer son rôle de lien entre un local et son environnement. De plus, une zone d'ombre est formée à proximité du mur de fenêtre. En général, il est préférable de coupler une telle fenêtre avec une fenêtre classique, équipée de protections solaires.

- ***Le matériau de transmission :***

La quantité et la qualité de la lumière transmise à l'intérieur du local par une ouverture dépendent du type de paroi vitrée, de sa rugosité, de son épaisseur de son état de propreté et du nombre de couches de verre utilisée.

La lumière qui rencontre un vitrage est transmise, absorbée, réfléchi, selon des proportions qui tiennent en grande partie du type de vitrage. Le choix du vitrage influence non seulement la lumière transmise mais aussi les gains solaires et pertes de chaleur à travers la fenêtre. La transmission lumineuse et énergétique d'un vitrage peut être caractérisée par trois paramètres :

- Son facteur de transmission lumineuse, (la quantité de lumière qui pénétré dans un bâtiment est d'autant plus grande que le facteur de transmission lumineuse d'un vitrage est élevé),

- Son facteur solaire, (plus grand est le facteur solaire, plus importante est la quantité d'énergie solaire qui pénètre dans le bâtiment.

- Son coefficient de conduction thermique. L'isolation de la plupart des matériaux transparents est très faible pour diminuer le coefficient de conductivité thermique d'un vitrage il est possible :

- D'agir sur les caractéristiques de la surface du verre (basse émissivité)
- D'augmenté le nombre de couches (double, triple)
- De remplacer l'air par un mélange de gazeux plus isolant

- ***l'inclinaison du matériau de transmission :***

L'inclinaison du matériau de transmission joue un rôle sur la qualité de rayonnement solaire direct qu'il laisse entre dans un espace. Pour un faisceau de lumière parallèle, le facteur de transmission lumineuse d'un vitrage varie en fonction de l'incidence des rayons.

I-2-2 les dimensions du local :

Le niveau d'éclairement et s'autant plus élevé dans un local que celui-ci est large, à condition que le rapport de la surface vitré sur la surface au sol soit constante.

La lumière diffuse ne pénètre significativement qu'à une surface double de la hauteur du linteau de la fenêtre par rapport au sol.

I-2-3 l'aménagement intérieur du local :

La nature de la couleur et des surfaces intérieur (paroi et mobilier) influence directement l'éclairage naturel du aux réflexions intérieurs. Ainsi, une bonne distribution de la lumière dans tout l'espace nécessite l'utilisation de couleurs claires. L'importance de cette clarté des surfaces est due à un double effet :

- Les facteurs de réflexion plus élevés permettent à la lumière d'être d'avantage réfléchi.
- L'œil humain analyse des niveaux de luminance : sous les mêmes conditions d'éclairage, une surface claire est donc subjectivement perçue comme mieux éclairée qu'une surface foncée.

Dans les salles de travail (tel que les ateliers de dessin) la clarté des tables de dessin s'avéré un élément favorable au confort visuel dans la mesure où la réduction du contraste

entre le papier et le support de la table induit une dimension des efforts d'accommodation que l'œil doit effectuer à chacun de ses mouvements.

Les meubles sont parfois des réels obstacles qui empêchent la transmission de la lumière vers certaines parties de la pièce. Il est donc essentiel de bien réfléchir aux types de meubles utilisés ainsi que leur emplacement d'une telle manière à favoriser la pénétration de la lumière naturelle.

I-3 Distribuer

Distribuer la lumière naturelle consiste à diriger et à transporter les rayons lumineux de manière à créer une bonne répartition de la lumière naturelle dans le bâtiment.

La difficulté d'utilisation de la lumière naturelle par rapport à la lumière artificielle réside dans la grande inhomogénéité des éclairagements qu'elle induit en général. La répartition de la lumière représente un facteur clé pour assurer un éclairage de qualité.

Une répartition harmonieuse de la lumière naturelle dans un bâtiment peut être favorisée par différentes approches basées sur :

- Le type de distribution lumineuse (direct, indirecte),
- La répartition des ouvertures :

La répartition de la lumière et la répartition des ouvertures vont de pair, étant donné que l'ouverture soit le seul moyen par lequel la lumière parvient dans un espace. Lorsqu'on parle de l'inclinaison de l'ouverture, on peut distinguer deux types d'ouverture : les ouvertures latérales et les ouvertures zénithales. Ces deux types d'ouverture réagissent différemment au rayonnement solaire qui les pénètre.

- ***L'éclairage latéral :***

Il peut engendrer de forts contrastes dans l'espace et créer de l'éblouissement. Les zones situées en profondeur peuvent ne pas avoir accès à la lumière. Mais ce type d'éclairage peut avoir des avantages. Outre la facilité de percevoir les reliefs, l'ouverture verticale capte au maximum les apports solaires en hiver et limite les pénétrations solaires estivales. La lumière est limitée en profondeur, mais elle est directionnelle. Donc, en plaçant les ouvertures à des niveaux hauts, on peut avoir une pénétration plus profonde de la lumière dans l'espace. La lumière qui entre par deux côtés opposés, ne fait qu'améliorer la pénétration de la lumière dans toute la pièce. L'éclairage bilatéral, offre cette possibilité. Il en résulte une meilleure

répartition de la lumière, et un éclairage plus uniforme. Afin d'améliorer encore plus l'uniformité de l'éclairage, on opte pour une multitude d'ouverture. Dans ce cas, il s'agit d'un éclairage multilatéral, nécessaire dans les bâtiments assez profonds, et les espaces qui nécessitent un éclairement très uniforme.

- ***L'éclairage zénithal :***

Il fournit une meilleure répartition de la lumière dans le local. Sa distribution de la lumière est très uniforme, et son niveau d'éclairement varie peu dans l'ensemble de l'espace. En contrepartie, cet éclairage, ne permet pas d'avoir une bonne perception du relief, et ses ouvertures sont difficiles à entretenir.

Lorsqu'on associe l'éclairage zénithal et l'éclairage latéral, on obtient un très bon éclairage général, et une mise en relief tridimensionnelle des objets.

1-3-1 L'agencement des parois intérieures :

L'agencement des cloisons et des ouvertures entre les pièces fait partie des paramètres de la distribution lumineuse. La lumière peut se répandre dans deux pièces si elles sont séparées par des cloisons transparentes ou translucides. Ceci, est aussi valable pour une pièce qui n'a pas de contact avec l'extérieur. Elle peut recevoir la lumière d'une autre pièce adjacente, par l'entremise des ouvertures horizontales ou verticales entre les deux pièces. Mentionnons aussi, que l'organisation des espaces intérieurs, la géométrie et la taille du local ont un fort impact sur la distribution de l'éclairage

1-3-3 Le matériau des surfaces du local :

Les dimensions du local agissent sur le niveau d'éclairement. Par dimension du local on entend trois distances : la largeur, la longueur et la hauteur. La hauteur du local n'a pas une grande influence sur sa répartition lumineuse, mais on constate que le niveau d'éclairement est un peu plus élevé dans les pièces avec un plafond plus bas. Une pièce avec une profondeur qui dépasse le double de la hauteur du linteau de la fenêtre, va voir son niveau d'éclairement chuter au fond. Donc il faut opter pour une profondeur faible. Concernant la largeur du local, le niveau d'éclairement est d'autant plus élevé dans un local que celui-ci est large. (A. DE HERDE, 2002)

I-3-3 Les zones de distribution lumineuse :

Lors de la conception architecturale, parfois il est inévitable de se retrouver dans des situations ou organisations des espaces ou la forme de l'enveloppe, donnent des espaces qui n'ont pas d'accès direct à la lumière du jour. Pour ce cas de figure, les zones de distribution lumineuses comme les serres, les atriums ou les puits de lumière semblent offrir une solution adéquate à ce problème

- La serre, est un capteur privilégié de la lumière naturelle par l'intermédiaire de l'espace vitré qui la constitue. La distribution lumineuse des locaux, qui lui sont adjacents, peut être améliorée. Mais elle est dans l'incapacité d'améliorer le manque de lumière au fond des pièces avoisinantes.

I-2-4 Les systèmes de distribution lumineuse :

Des systèmes améliorant le confort visuel à l'intérieur d'un local sont des systèmes qui distribuent la lumière, favorisent sa pénétration plus profondément dans la pièce et qui sont considérés comme moyens pour transporter la lumière naturelle depuis la façade ou la toiture vers les zones les plus éloignées des ouvertures. Ces systèmes agissent sur le rayonnement solaire diffus, ou sur le rayonnement solaire direct. En ce qui concerne le rayonnement solaire direct, on relève un certain nombre de systèmes comme :

I-2-5 Les conduites solaires :

Elles transmettent la lumière solaire directe au cœur du bâtiment. Les vitrages directionnels : ils redirigent efficacement les rayons solaires directs vers le fond d'une pièce. Ils peuvent aussi être utilisés pour rediriger la lumière zénithale vers le bas d'un atrium.

- ***Les light shelves :***

Ils permettent la pénétration, dans le local, du rayonnement solaire réfléchi sur leurs parties supérieures. Ils ont pour but de rediriger la lumière naturelle vers le plafond en protégeant l'occupant des pénétrations directes du soleil.

- ***Les stores réfléchissants :***

Utilisés dans le double but d'ombrager un espace du rayonnement direct et de rediriger la lumière naturelle vers le fond du local.



Figure 24 Fenêtre avec light shelve
(Source: <http://sustainability.williams.edu/>)

- ***Les appuis de fenêtre réfléchissants :***

Ils réfléchissent et redirigent la lumière naturelle pour augmenter le niveau d'éclairement de l'espace intérieur.

- ***Le laser-cut panels :***

C'est un système de redirection de la lumière produit par des coupures réalisées par un laser dans un matériau acrylique.



Figure 25 Système de redirection de lumière (Source : <http://www.aviationwallpaper.com/>)

- ***Les vitrages directionnels :***

- Les vitrages directionnels redirigent les rayons solaires directs vers le fond d'une pièce. Ils peuvent aussi être employés pour rediriger la lumière zénithale vers le bas d'un atrium ou vers une salle en sous-sol. Cependant, sous ciel gris, le niveau lumineux en fond de local est inférieur à celui d'un double vitrage classique. Les panneaux directionnels sont utilisés en configurations fixes et mobiles.

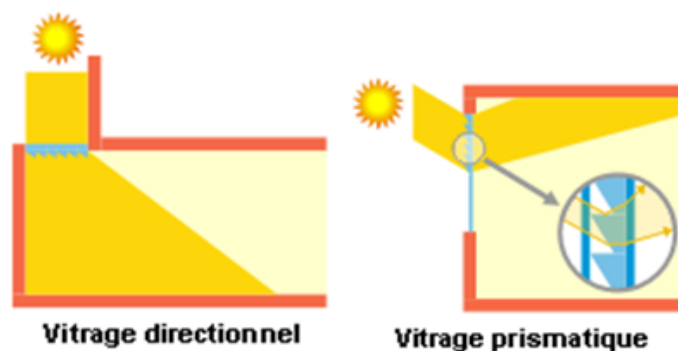


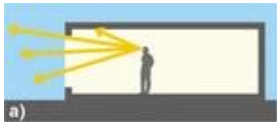
Figure 26 Vitrage directionnel (Source: <http://www.energieplus-lesite.be/>)

- Les vitrages prismatiques peuvent soit rediriger la lumière naturelle plus profondément dans le bâtiment soit exclure la lumière d'un espace. Bien qu'ils soient habituellement transparents, ils obscurcissent la vue vers l'extérieur. Il vaut donc mieux les utiliser pour la partie supérieure d'une fenêtre afin de ne pas couper la vue des occupants vers l'extérieur.

I-4 Se protéger :

Se protéger de la lumière naturelle consiste à arrêter partiellement ou totalement le rayonnement lumineux lorsqu'il présente des caractéristiques néfastes à l'utilisation d'un local. Pour atteindre le confort visuel, il est essentiel de se protéger de l'éblouissement.

Différentes précautions peuvent être prises pour diminuer les risques d'éblouissement dus à l'éclairage naturel :

Différent précaution pour diminuer les risques d'éblouissement.	figure
a) Prévoir une grande fenêtre plutôt que plusieurs petites fenêtres. En effet, une grande ouverture à la lumière naturelle occasionne moins d'éblouissement qu'une petite car elle augmente le niveau d'adaptation des yeux et diminue le contraste de luminance et la sensation d'éblouissement qui lui est associée.	
b) Voiler le ciel par l'utilisation d'une protection solaire ;	
c) Voiler en partie le ciel en assombrissant la fenêtre par un élément déflecteur (lightshelf, murs de refends, débords de toiture...) ;	
d) Voiler en partie le ciel en disposant à l'extérieur des éléments moins lumineux que le ciel (atrium, cour intérieure) ;	
e) Situer les percements en hauteur (ouvertures zénithales, clere-stories...), afin de limiter l'éblouissement direct puisque la plupart des tâches visuelles nécessitent une vue horizontale ou vers le bas.	
f) Diminuer le contraste fenêtre-châssis en augmentant le coefficient de réflexion du châssis au moyen de couleurs claires et mates ;	

g) Diminuer le contraste mur-fenêtre en éclairant le mur qui contient la fenêtre ;	
h) Diminuer le contraste mur-fenêtre en augmentant le coefficient de réflexion du mur qui contient la fenètre ;	
i) Diminuer le contraste mur-fenêtre en augmentant la part indirecte de l'éclairage naturel au moyen de parois très claires ;	
j) Favoriser les revêtements mats car ils diffusent la lumière.	

Tableau 4 Différentes précautions prises pour diminuer les risques d'éblouissement dus à l'éclairage naturel

On appelle protection solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas voir ensoleillée. Citons, par exemple, la végétation, les auvents, les écrans mobiles ou les vitrages spéciaux.

I-4-1 Les types de protections solaires :

- ***Les protections liées à l'environnement.***

La végétation peut servir à réduire l'exposition d'une fenêtre au soleil, les plantations doivent être choisies soigneusement en prenant en compte leur taille et leur type (les plantes à feuilles caduques, plantes grimpantes etc...)

La construction formant des écrans fixe pour le voisinage. Leur rôle peut être positif si l'on cherche une protection contre le soleil.

Le relief influence les possibilités d'ensoleillement. La topographie peut constituer un ombrage important à l'ensoleillement.

- ***Les éléments architecturaux***

Les éléments architecturaux sont des éléments fixes intégrés dans la structure du bâtiment comme, par exemple, des surplombs, les auvents ...

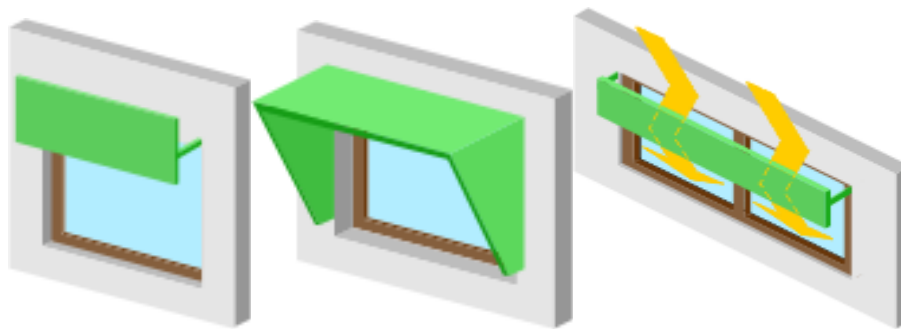


Figure 27 Protection solaire par des éléments architecturaux (Source : <http://www.energieplus-lesite.be/>)

Par définition, ils doivent être projetés dès la conception du bâtiment. Leur performance est semblable aux brise-soleil.

- ***Les protections extérieures :***

- ***Les brise-soleil :***

Les brise-soleil sont composés généralement de lames en aluminium disposées sur un châssis. La position de la protection peut être :

- Horizontale, perpendiculaire au plan de la fenêtre, pour les fenêtres orientées au sud,



Figure 28 Brise-soleil horizontale (source : <http://www.archiexpo.fr/>)

- verticale, perpendiculaire au plan de la fenêtre pour les fenêtres orientées à l'est ou à l'ouest,



Figure 29 Brise-soleil verticale (Source : <http://www.archiproductions.com/>)

- parallèle au plan de la fenêtre, soit directement devant la fenêtre.

- **Les stores vénitiens à lamelles :**

Les stores vénitiens extérieurs sont composés de lamelles généralement en aluminium. L'ensemble du store peut être remonté et les lamelles peuvent être orientées grâce à un système de câbles ou de chaînes.

L'orientabilité des lamelles permet une variation de la transmission lumineuse. Selon l'inclinaison, les réflexions entre lamelles permettent alors un éclairage naturel du local plus ou moins important tout en protégeant les occupants du rayonnement direct du soleil.

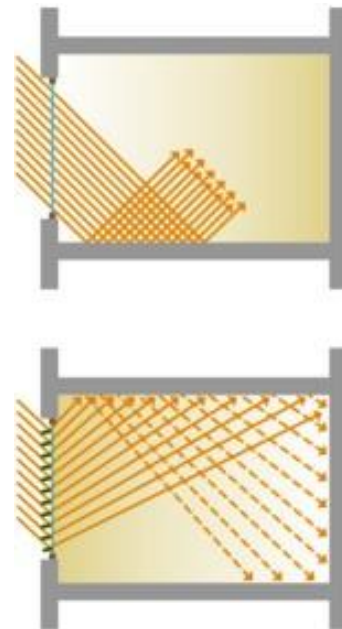


Figure 30 Store vénitien à lamelles (Source: <http://www.energieplus-lesite.be/>)

Une orientation judicieuse des lames favorisera une répartition plus équitable de la lumière dans les locaux, diminuant l'éblouissement auprès des fenêtres et diffusant la lumière à l'intérieur.

La réflexion de la lumière par les lamelles dépendra du type et de la couleur du matériau de surface utilisé (réflexion spéculaire ou diffuse).

- **Les stores en toiles enroulables :**

Les stores enroulables sont composés d'une toile qui se déploie devant la fenêtre. La protection est complètement amovible.

Généralement seules les extrémités de la partie inférieure de la toile coulissent soit dans des rails latéraux, soit le long de câbles tendus.

La manipulation des stores se fait depuis l'intérieur des locaux au moyen de manivelles. Elle peut être motorisée et automatisée.



Figure 31 Store en toile enroulable (Source: <http://www.atelierdustorepro.com/>)

Tout comme le facteur solaire, la transmission lumineuse dépend du coefficient d'ouverture ainsi que de la teinte du store. Plus la protection sera claire, plus sa transmission lumineuse sera importante.

- Les stores projetés à l'italienne

Combine les propriétés des protections enroulables verticales et des protections horizontales.

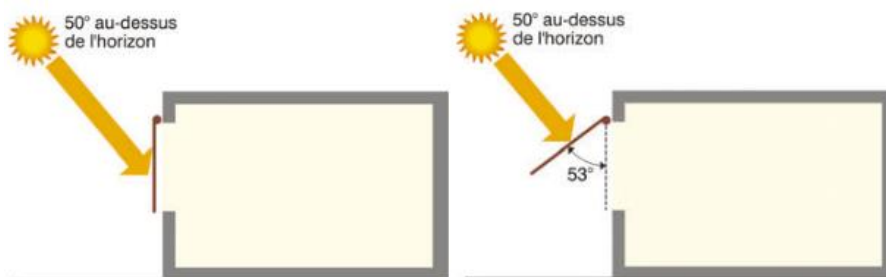


Figure 32 Store projetés à l'italienne (source: Magali Bodart UCL - Architecture et Climat)

- ***Les protections intérieures***

- ***Les stores enroulables et les stores plissés***

Le mécanisme des stores enroulables intérieurs est similaire à celui de leurs homologues extérieurs.

Les stores plissés peuvent être à simple ou double paroi (structure alvéolaire). Ils associent une certaine esthétique à la protection.



Figure 33 Stores plissés (Source: <http://www.hbstores-geneve.ch/>)

La transmission lumineuse dépend de la couleur et du coefficient d'ouverture du store. Plus celui-ci sera clair, plus la lumière transmise sera importante. Remarquons que la transmission lumineuse de certains stores réfléchissants peut être insuffisante pour assurer un éclairage naturel lors du déploiement.

- ***Les stores à lamelles et les stores vénitiens***

Les stores à lamelles verticales et les stores vénitiens peuvent être considérés comme un mode semblable de protection.

Les premiers sont composés de lames verticales orientables et escamotables de part et d'autre de la fenêtre, en aluminium laqué ou en tissu (semblable au tissu des stores enroulables).

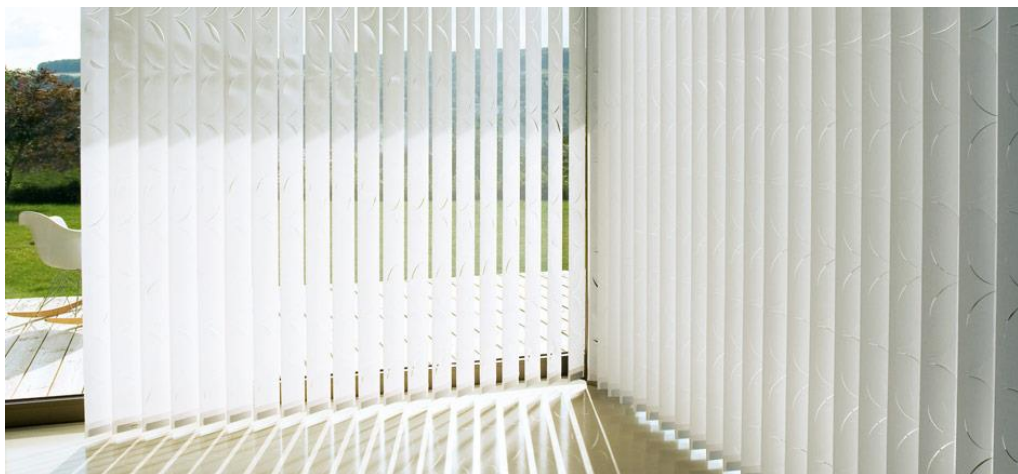


Figure 34 Store à lamelles (Source : <http://crumbprints.com/>)

Les stores vénitiens comportent des lames horizontales orientables en aluminium laqué, matière plastique ou bois. Certains stores peuvent avoir des lamelles perforées. Les stores peuvent être remontés ou abaissés selon les désirs. La largeur des lames peut être choisie en fonction de l'effet esthétique recherché.



Figure 35 Store vénitiens en aluminium (source : <http://www.soliso.com/>)

Le principal objectif de ce type de store est de gérer l'éclairage naturel d'un local. La quantité de lumière transmise à l'intérieur d'un local dépendra de l'orientation des lames que choisira l'utilisateur en fonction de ses besoins.

Comme pour les stores vénitiens extérieurs, une orientation judicieuse des lames permettra de diffuser la lumière plus profondément dans les locaux tout en protégeant les occupants de l'éblouissement aux abords des fenêtres.

Certains stores en tissu conservent une certaine transparence lorsque les lamelles sont complètement fermées. Dans ce cas, ils ont une TL semblable aux stores enroulables en tissu.

- **Les rideaux**

C'est un élément de contrôle flexible, opaque ou diffusant. La transmission lumineuse dépend de la couleur et du coefficient d'ouverture. Plus celui-ci sera clair, plus la lumière transmise sera importante.



Figure 36 Système de rideau (Source: <http://inside-harmony.fr/>)

- ***Les vitrages protecteurs :***
 - ***Vitrage absorbant et vitrage réfléchissant***

Le vitrage absorbant est conçu de façon à absorber une partie des rayonnements solaires incidents avant de les émettre vers l'intérieur. Il est teinté dans la masse (bronze, gris, bleu...) par adjonction d'oxydes métalliques à la composition.

Le vitrage réfléchissant joue le rôle d'un miroir, pour la face qui est exposée à la lumière. Il produira donc un effet de miroir depuis l'extérieur durant la journée mais ce rôle de miroir sera inversé et apparaîtra depuis l'intérieur du bâtiment durant la nuit, rendant difficile la vision vers l'extérieur.



Figure 37 Vitrage absorbant (Source : <http://www.fakro.be/>)

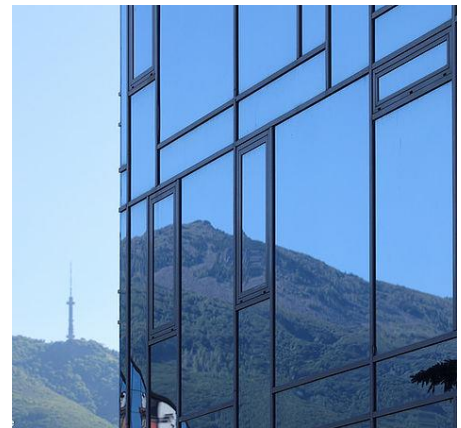


Figure 38 Vitrage réfléchissant (Source: <http://www.bkverre.ch/>)

Associe les deux propriétés au sein d'un même vitrage. Une couche d'oxyde métallique est simplement déposée sur un même verre absorbant

- *Le film adhésifs*

Un film est apposé de façon indélébile sur une face du vitrage (généralement à l'intérieur). Certains films offrent une vue de l'intérieur vers l'extérieur mais pas l'inverse. la pose de film protecteur s'applique typiquement à la rénovation. Elle permet de corriger un mauvais choix de vitrage.



Figure 39 fenêtre avec film adhésif posé sur la partie inférieure (source: <http://www.solartech-nord.fr/>)

I-5 Contrôler :

Contrôler la lumière naturelle consiste à gérer la quantité et la distribution de la lumière dans un espace en fonction de la variation des conditions climatiques et des besoins des occupants.

La gestion de l'éclairage permet, d'une part, de répondre à la variation continue de la lumière naturelle et, d'autre part, d'adapter l'ambiance lumineuse d'un local pour correspondre au mieux aux besoins de ses utilisateurs. On peut diviser les solutions de contrôle de l'éclairage naturel en trois catégories :

- L'utilisation de systèmes d'éclairage naturel adaptables, tels que des éléments de contrôle amovibles.
- Le zonage de l'installation d'éclairage artificiel en fonction de la lumière naturelle disponible.
- La régulation du flux des lampes en fonction de la présence de lumière naturelle.

Le contrôle de la lumière naturelle d'un bâtiment est à la base de la conception d'un éclairage qui intègre le comportement dynamique de la lumière naturelle.

I-5-1 les systèmes adaptable :

Les systèmes adaptable regroupe tous les éléments de l'architecture qui peuvent être modifiés en fonction des conditions de luminosité, du moment de l'année du désir des occupants afin d'améliorer l'éclairage naturel d'un bâtiment

Parmi ces systèmes nous trouvons les light shelves mobile, certains vitrages qui ont des propriétés optiques contrôlables, la végétation, les systèmes de contrôles amovibles etc... tous ces systèmes offre la possibilité de contrôler l'intensité lumineuse pour un confort visuel optimum et une meilleur gestion des ambiances lumineuse.

I-5-2 les systèmes de gestion de l'éclairage artificiel :

Les systèmes de gestion de l'éclairage artificiel permettent le contrôle du flux lumineux en fonction de la présence des occupants ainsi que de la disponibilité de la lumière naturelle

- Le zonage de l'installation électrique en fonction de la lumière naturel.
- La régulation de la lumière.

- ***Commande de temps intelligente :*** Dans des parties du bâtiment où aucune détection de présence n'est recommandée, on peut mettre en œuvre une commutation ou gradation à commande de temps.

- ***Régulation dépendant de la lumière du jour :*** Des détecteurs de lumière du jour peuvent modifier automatiquement les niveaux d'éclairage, en tenant compte de la lumière du jour présente.

- ***Adaptation à la tâche :*** Chaque installation d'éclairage dispose d'une réserve lorsqu'elle est neuve. Celle-ci est économisée en réglant le niveau d'éclairage pour chaque tâche.

- ***Détection de mouvement :*** À l'aide de capteurs de mouvement, il est possible d'allumer, éteindre ou graduer automatiquement l'éclairage.

- ***Régulation individuelle :*** Lorsque les utilisateurs reçoivent le contrôle de l'éclairage sur leur lieu de travail, ils peuvent l'adapter à leur préférence personnelle.

III- Expérience et Exemple sur des équipements éducatifs :

Si l'éclairage ne suffit pas à lui seul à gommer les difficultés scolaire rencontrées par les élevés de la maternelle à l'université, il peut contribuer largement à améliorer leur perception visuelle, leur confort, leur environnement, a des couts réduits.

A l'école 70% de l'information passe par la vision. La qualité de l'éclairage doit donc retenir l'attention de tous : enseignants, gestionnaires, architectes et bureaux d'études.

III-1 Expérience N°1 :

« L'impact de l'éclairage sur l'apprentissage et la productivité »

Il est reconnu que l'éclairage a un effet notable sur notre humeur, les matins nuageux et sombres nous nous sentons moins en forme que lors de belles journées ensoleillées. Mais l'éclairage a également un effet sur nos capacités cognitives, comme l'apprentissage et la productivité ?

Une étude⁹ a été menée en 2010 sur des élèves d'une école primaire allemande a mis à l'épreuve cette hypothèse avec un système d'éclairage dynamique. Grâce à ce système, les professeurs ont pu faire varier la luminosité ou la couleur de la lumière dans leurs salles de classe en fonction de l'heure ou de la leçon, le but étant de voir si, dans certaines situations, le changement d'éclairage entraînait une modification des comportements de la classe.

Un éclairage adapté pour chaque activité

- Le dispositif d'éclairage disposait de quatre paramètres principaux, Normal, Énergie, Concentration et Calme, qui ont tous été créés pour favoriser un environnement soit stimulant soit relaxant.
- Le réglage Énergie avait un niveau d'intensité supérieure et une couleur très froide afin de stimuler le dynamisme des élèves lorsqu'ils avaient besoin d'être plus actifs, à des moments comme le matin ou après le déjeuner.
- Le mode concentration possédait la lumière la plus intense et une couleur moins froide que le mode Énergie afin de faciliter la concentration lorsque les enfants devaient accomplir des tâches difficiles telles que répondre à des questionnaires ou des tests.
- Le réglage Calme diffusait une lumière d'intensité standard et avait une couleur chaude, ce qui contribuait à créer une ambiance de détente pour le travail individuel ou des temps de repos.

⁹ Information extraite du site <https://www.leclubled.fr/> consultée le 08/06/2016.

Voici ce qu'ils ont constaté :

- Une amélioration de 35 pour cent de la vitesse de lecture et un taux d'erreurs inférieur de près de 45 pour cent au groupe témoin.
- L'hyperactivité chez les enfants a également été réduite de 76 pour cent grâce au mode Calme, un chiffre que le groupe témoin est très loin d'atteindre.

Ces chiffres semblent clairement soutenir le fait que l'éclairage produit des effets psychologiques qui influent sur notre capacité d'attention, de concentration, et sur notre comportement. De plus, ces résultats concordent avec d'autres études qui prouvent que cet effet est réel non seulement sur des enfants dans une salle de classe, mais aussi sur des adultes dans leur environnement de travail.

III-2 Expérience N°2 :

« L'effet de la lumière sur les performances des élèves »

En 2011, OSRAM et le Transferzentrum für Neurowissenschaft und Lernen (' Centre de transfert pour la neuroscience et l'apprentissage ') ont mené une étude conjointe dans des écoles de la ville d'Ulm, en Allemagne, afin de déterminer si et de quelle manière un éclairage optimisé sur le plan biologique dans une salle de classe peut contribuer à stabiliser le rythme circadien et ainsi renforcer la vivacité le matin. La question : une lumière similaire à la lumière du jour peut-elle contribuer à augmenter la concentration et la vivacité des élèves le matin et leur permettre d'obtenir de meilleurs résultats à des tests cognitifs ?



Figure 40 Salle de classe "cas d'étude" (Source: <http://www.osram.fr/>)

III-2-1 Réalisation de l'éclairage optimisé sur le plan biologique dans le cadre de l'étude :

Deux classes d'un lycée technique et d'un lycée professionnel ont participé à l'étude (soit, au total 68 élèves âgés de 17 à 20). Le nouveau concept d'éclairage optimisé sur le plan biologique a été installé dans une salle de classe de chaque établissement (la salle d'intervention) et, dans chacun des cas, une salle adjacente servait de salle de comparaison. Dans cette salle, l'éclairage n'a pas été modifié



Figure 41 Eclairage utilisé pour le cadre de l'étude (source : <http://www.osram.fr/>)

Dans le cadre de l'étude des luminaires LED suspendus ont été utilisés pour l'éclairage de la salle de classe. La température de couleur de l'éclairage direct était de 4 000 Kelvins. Un module LED a été spécifiquement conçu pour l'étude afin d'éclairer le plafond de la pièce (éclairage indirect) et intégré au système de luminaires.

L'association de LED bleues et blanc froid a ainsi permis d'obtenir une température de couleur très élevée, similaire à la température de couleur de la lumière du jour, qui a atteint jusqu'à 14 000 Kelvins dans les salles de classe. Le système de commande de l'éclairage a également permis une adaptation dynamique de l'intensité lumineuse et des températures de couleur en fonction du rythme de l'horloge interne des élèves à tout moment de la journée.

III-2-2 Synthèse de l'étude sur l'éclairage des écoles :

L'étude a révélé des résultats globalement positifs pour les élèves qui avaient suivi les cours dans la classe équipée d'un système d'éclairage efficace sur le plan biologique.

L'augmentation de la faculté d'attention, la rapidité des performances cognitives et la capacité de mémorisation du groupe d'intervention et du groupe de référence ont été directement comparées. Lors du test, le groupe d'intervention a obtenu des résultats nettement meilleurs que les autres élèves des classes de référence. L'augmentation de la rapidité des

performances cognitives était également nettement supérieure et une tendance similaire a été observée en ce qui concerne les tests menés sur les capacités de mémorisation.

III-3-le lycée Freiherr-vom-Stein-Gymnasium à Münster :



Figure 42 le lycée Freiherr-vom-Stein-Gymnasium à Münster
(source : <http://www.freiherr-vom-stein-gymnasium-muenster.de/>)

Pour le 50^e anniversaire de son emplacement, le lycée Freiherr-vom-Stein-Gymnasium à Münster s'est offert un nouvel espace d'apprentissage. la nouvelle construction dans le quartier de Glevnbeck ne devait pas seulement être intégrée de manière harmonieuse dans l'environnement mais également refléter le concept pédagogique.

Un concept d'éclairages souligne l'architecture : des luminaires, la plupart du temps, placés linéairement structure les espaces, aident à s'orienter et assurent des conditions d'éclairages optimales. Le système de gestion en fonction de la lumière du jour assure un niveau d'éclairement constant à tout moment de la journée et contribue à économiser jusqu'à 67% d'énergie, donc de réduire la facture d'électricité et les émissions de CO2.



Figure 43 Salle de cours du lycée Freiherr-vom-Stein-Gymnasium (source : <https://www.trilux.com>)



Figure 44 vue d'intérieur du lycée Freiherr-vom-Stein-Gymnasium (source : <https://www.trilux.com>)

Un éclairage qui soutient l'apprentissage. Des rectangles de lumière éclaire les places assises des écoliers, ce qui procure des conditions de lumière uniformes et sans réflexion. De plus, des luminaires séparés mettent l'accent sur le bureau de l'enseignant et le tableau.

Pour apprendre, il faut de la concentration. Pour la concentration, le bien-être est important. Et pour cela, il faut aussi que l'environnement soit adapté.

Le mélange flexible de lumière du jour et de lumière artificielle a un effet extrêmement positif sur le bilan énergétique et il augmente la concentration dans les salles de classe et ca constitue un plus pour les élèves et les enseignants.

IV-Règlementation et normes relatives à l'éclairage intérieur des salles d'enseignement :

La réglementation relative à l'éclairage des locaux d'enseignement diffère d'un pays à un autre. Elle concerne surtout les établissements du premier et second degré mais il n'existe pas une réglementation spécifique aux établissements universitaires.

Pour notre étude, nous nous intéresserons à la réglementation régit par quatre pays en particulier, à savoir : la France, la Belgique, le Royaume Uni et enfin, l'Algérie résumées par le tableau suivant :

Pays	Niveaux d'éclairement recommandé (lux)	Recommandations spécifiques
Canada	Bureau (dessin/lecture) 1000 lx Travail sur écran 500 lx	
États-Unis	Dessin 500 lx (300 lx sur le plan horizontal) Travail de CAO et dessin 300 lx Travail de CAO 100 lx	Écran interactif et vidéoprojecteur : assombrir la salle. Tableau blanc : éviter l'éblouissement.
Grande Bretagne	Dessin 500 lx Bureau 200 lx	
France	Dessin 400 lx Bureau 300 lx	
Algérie	Bureau 200 lx	

Table 5 Comparaison entre les différentes normes relatives à l'éclairage (Source : M.A.DIRAHOUI 2015)

Dans notre cas d'étude nous nous référerons à la norme européenne qui nous semble la plus explicite.

L'exigence de la norme EN 12464

La lumière participe directement à la bonne qualité des conditions de travail et donc de la tâche effectuée. Tous les acteurs ont donc intérêt à améliorer la qualité de l'éclairage.

Pour le gestionnaire, il est souhaitable de limiter les consommations électriques, les coûts de maintenance et de simplifier les opérations d'entretien, et ce, dans le respect des textes réglementaires en vigueur.

Pour les utilisateurs, il s'agit d'effectuer une tâche visuelle (qu'elle soit : dans un bureau, une salle de classe, un musée, etc.), dans les meilleures conditions, les notions de performance visuelle, de confort visuel et de contrôle de la lumière sont donc essentielles. Elles sont fonction de l'aptitude d'un individu à exécuter une tâche en un temps donné et de l'environnement visuel lié aux conditions d'éclairages du local : niveau d'éclairement, contrôle de l'éblouissement, limitation de la luminance des sources de lumière, équilibre de la luminance des sources et des parois, suppression des reflets.

1) Éclairement et uniformité

Cependant, les zones environnantes immédiates (bande de 0,5 m au moins entourant la zone de travail) et la totalité de la zone occupée doivent être en rapport avec la zone de travail dans les proportions ci-dessous. Dans ce tableau, on trouvera également les uniformités mini à respecter pour chacune de ces zones.

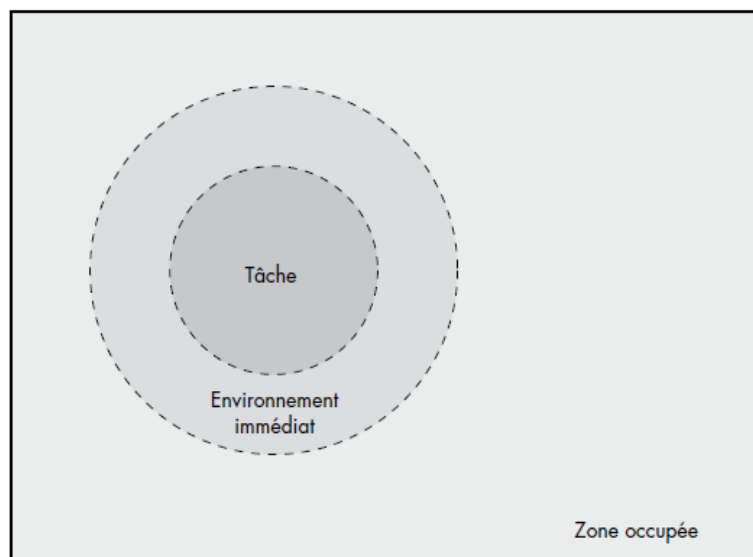


Figure 45 Eclairage de la tâche visuelle. (Source : <http://www.thornlighting.fr/>)

Tâche	Environnement Zone	immédiat occupée
750	500	200
500	300	200
200	200	200
< 200	E tâches	200
Facteur d'uniformité (%)		
0,7	0,5	0,5

Tableau 6 Éclairement moyen (lux) (Source : <http://www.thornlighting.fr/>)

2) les niveaux d'éclairage :

L'éclairement moyen à maintenir est défini par l'Association française de l'éclairage comme « l'éclairage juste acceptable avant une intervention d'entretien : nettoyage des luminaires, complété ou non par le remplacement simultané des lampes »

Cette valeur constitue le seuil en dessous duquel l'éclairage moyen possible et disponible de la surface considéré ne peut pas descendre ou une opération de maintenance doit être déclenchée.

Tache ou activité	Em (Lux)	UGR	IRC	Plan de référence
Classement, transcription	300	19	80	Zone de travail ou 0,85m du sol
Ecriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500	19	80	
Dessin industriel	750	16	80	
Postes de travail de conception assisté par ordinateur (CAO)	500	19	80	
Salle de conférences de réunion	500	19	80	
réception	300	22	80	

Tableau 7 Eclairement moyen à maintenir, UGR, IRC : Valeurs recommandées par la norme EN 12494 pour l'éclairage des bureaux (source : les classeurs de Techni.Cités-mars 2011)

- éblouissement et luminances :

L'évaluation de l'éblouissement d'inconfort doit être déterminée en utilisant la méthode tabulaire d'évaluation du taux d'éblouissement unifié (UGR¹⁰) de la Commission internationale de l'éclairage. Ce calcul est fourni par les fabricants ou les bureaux d'études

¹⁰ L'UGR représente l'éblouissement d'inconfort provenant directement des luminaires d'une installation d'éclairage intérieur. UGR varie, en pratique, entre 10 (éblouissement imperceptible) et 30 (éblouissement intolérable). Un pas d'UGR de 1 est la plus petite différence détectable. Un pas de 3 est un pas acceptable en termes de critère d'évaluation du taux d'éblouissement.

spécialisés. Il doit être de 19 dans la plupart des bureaux et locaux d'enseignement. Pour une qualité de lumière optimale, l'indice de rendu des couleurs (IRC) doit être au moins égal à 80 dans tous les locaux.

La norme NF EN 12464 donne des valeurs de facteurs de réflexion qui sont déterminants pour l'équilibre des luminances. Ils vont de 0.6 à 0.9 pour le plafond, de 0,3 à 0,8 pour les murs, de 0,1 à 0,5 pour le sol et de 0,2 à 0,6 pour le plan utile.

BATIMENT SCOLAIRE			
Type d'intérieur, tâche ou activité	Em	URGL	remarques
Salle de classe en primaire et secondaire	300	19	Il est recommandé un contrôle de l'éclairage
Salle de classe pour les cours du soir et enseignement aux adultes	500	19	Il est recommandé un contrôle de l'éclairage
Salle de conférence	500	19	Il est recommandé un contrôle de l'éclairage
Tableau noir	500	19	Eviter les réflexions spéculaires
Table de démonstration	500	19	Pour les salles de conférence 750 lux
Salle d'art	500	19	
Salle d'art dans les écoles des beaux-arts	750	19	$T_{cp} \geq 5\ 000k$
Salles de dessin industriel	750	16	
Salle de travaux pratique et laboratoire	500	19	
Salle de travail manuel	500	19	
Ateliers d'enseignement	500	19	

Tableau 8 Niveaux d'éclairéments et URG prescrits par la norme EN 12464 (source : les classeurs de Techni. Cités-mars 2011)

Les écrans de visualisation et les claviers peuvent produire des réflexions causant de l'éblouissement perturbateur et d'inconfort. Il est donc nécessaire de choisir, situer et disposer les luminaires pour éviter les réflexions de forte luminosité.

Les niveaux d'éclairément exigés par la norme en 12464 dans les locaux d'enseignement varient entre 300 et 500 lux.

Conclusion :

Il est notoirement connu que la lumière naturelle joue un rôle primordial sur la qualité du rapport entre un édifice et son environnement où l'occupant est au centre de cette interaction. La stratégie de la lumière naturelle a pour but de répondre aux exigences de confort des personnes. L'utilisation intelligente de la lumière naturelle permet, en outre, de réduire la consommation d'énergie des bâtiments.

Malheureusement, l'effet de la lumière sur le comportement humain est moins facile à mesurer ou à étudier que les économies d'énergie, peu d'écoles ou d'entreprises mettent en œuvre un système d'éclairage adapté. Or, une simple modification de l'éclairage sur le lieu de travail pour le rendre plus doux et plus naturel peut clairement faire une grande différence dans l'amélioration du rendement

Chapitre 3

Cas d'étude : Analyse expérimentale et simulation numérique

I-Présentation du cas d'étude :

L'objet de notre étude consiste en l'évaluation de la qualité de l'éclairage dans les ateliers, dans le but de déterminer le niveau du confort visuel et de déceler la présence d'éventuelles gênes dues au comportement de la lumière dans ces espaces.

I-1-Situation et organisation :

Le département d'architecture de Tamda, construit en 2007, se situe à 15 kilomètres à l'Est du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou.



Figure 46 Vue aérienne su l'extension de l'université MMTO a Tamda

(Source : Google earth)

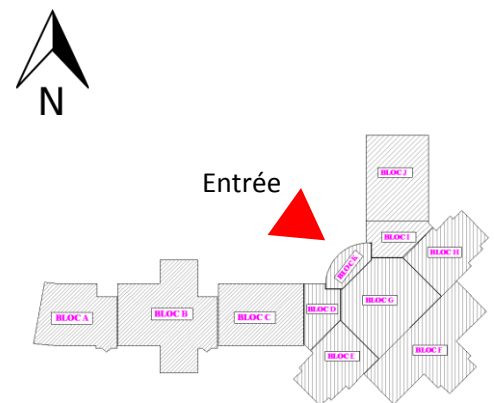


Figure 47 Département d'architecture
(Source : Bureau d'étude B.E.R.H.T.O)

Ce dit département est implanté dans l'enceinte du pôle universitaire de Tamda notamment au coin Sud-Ouest (en bleu sur la photo aérienne ci-dessous.). Il est bâti sur une superficie de 3 000 m² et constitué d'un gabarit de R+3 sous forme de « L ».

On y accède par une entrée (voir plan) donnant sur un espace central ouvert (un patio), considéré comme lieu de regroupement, d'exposition et de détente. Autour de cet espace sont agencés différents locaux pédagogiques (Bibliothèque, amphithéâtres, vidéothèques, quelques salles de cours et ateliers). Ce même espace dessert deux ailes linéaires (l'une orientée vers le Nord et l'autre vers l'Est) réservées aux salles de cours et de TD.

I-2 Orientation et ensoleillement :

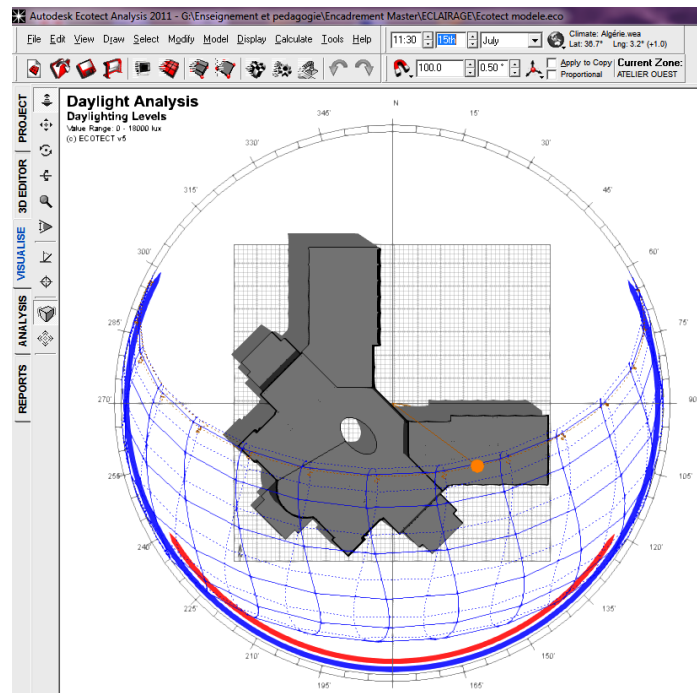


Figure 48 Représentation du bloc dans le diagramme solaire de Tamda le moi
Juillet (latitude 36.4° et longitude 4.1°) source : Autodesk Ecotect Analysis 2011

Nous constatant que le département d'architecture est bien ensoleillé, on retrouve des ateliers avec différentes orientations (Nord, Sud, Est et Ouest.) et l'absence de masques dans l'environnement immédiat.

I-1-1 Composition des façades :

Les façades du bâtiment sont pratiquement identiques, sur tous les côtés, dans leur composition et traitement. Elles ne sont pas dotées de protections solaires, ni de l'intérieure ni de l'extérieure.



Figure 49 vue sur l'extérieur département d'architecture (Source : Photo prise par l'auteur)

I-1-2 Critère de choix :

Notre option pour le département d'architecture est motivée par trois facteurs déterminant sur le plan éclairage à savoir :

- 1- La nature et la diversité des activités qui y sont pratiquées (dessin sur papier, sur ordinateur écriture-lecture et réalisation des maquettes.) ;
- 2- Le type des ouvertures des façades (mur rideau, fenêtre en hauteur.)
- 3- Les orientations des différents ateliers et salle de Travaux dirigés.

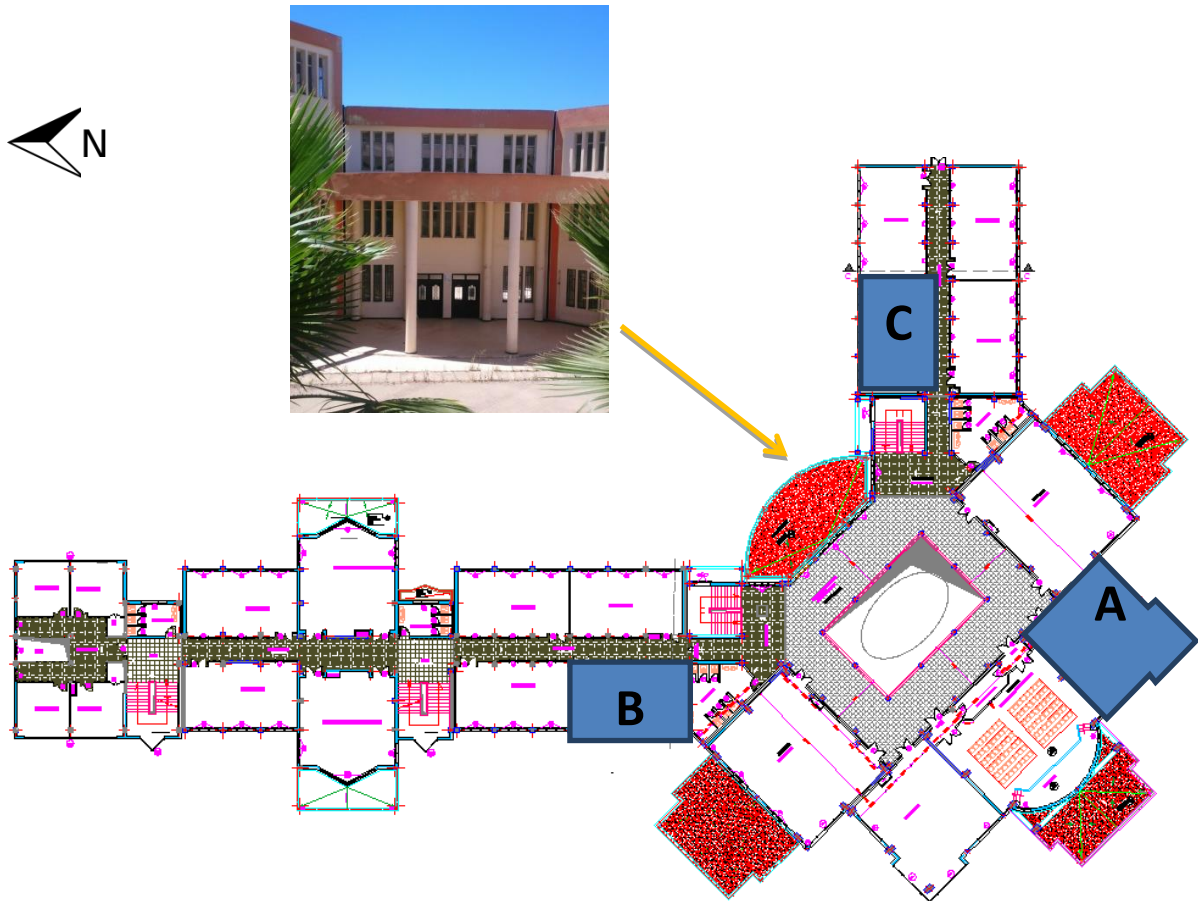


Figure 50 Plans du département d'architecture (Source : Bureau d'étude B.E.R.H.T.O)

Cependant, notre étude se focalise sur deux ateliers d'architecture et une salle travaux diriger (A, B et C sur le plan), retenus eu égard à leurs orientations (Sud et Nord) et leurs types d'ouvertures, et jugés a priori défavorisés du point de vue éclairage d'autre part.

Nous effectuerons nos travaux en deux phases à savoir :

- 1- L'analyse de l'éclairage de l'atelier A et de la salle C compte tenu de leurs différentes orientations, respectivement au Sud et au Nord, nous permettra d'apprécier l'influence de l'orientation sur l'environnement lumineux de ces espaces.

2- L'analyse de l'éclairage, en fonction de la hauteur du soleil, de l'atelier A et B orientés respectivement au Sud et à l'ouest, nous permettra d'apprécier le niveau du confort visuel et cerner les principales gênes, découlant des rayonnements solaires directs, ressentis par les usagers des lieux.

I-2-Description des ateliers :

I-2-1-Atelier A :

C'est un atelier de forme carrée, situé à cheval sur l'axe Est-Ouest, comportant un décrochement dans sa partie Sud.

Il est utilisé en guise de salle de cours et de dessin.

1- Description de l'intérieur de l'atelier :

Il compte une superficie de 99.00m², son plafond est de couleur blanche ainsi le plancher qui est en carrelage. Les murs sont de couleur blanc-cassée sur les quels sont placardés des tableaux d'affichage marron en bois et un tableau vert. Il renferme vingt-deux (22) tables à dessin de couleur blanche.



Figure 51 Vue d'intérieur de l'atelier A (Source : photo prise par l'auteur)

2- Description des façades :

L'atelier compte deux façades orientées Sud-est et Sud-ouest, composées toutes les deux d'un mur d'un mur-rideau de (470cm x 335cm) et d'une baie vitrée (260cm x 150cm).

La surface de ces ouvertures occupée 60% des façades exposées.

Le mur-rideau est constitué d'un double vitrage de couleur bleu qui teinte et atténuer la lumière naturelle durant toute l'année.

Les baies vitrées, quant à elles, ont un vitrage transparent laissant un passage important de lumière suite à quoi il a été recouvert par des feuilles épaisses de papiers de couleur grise.



Figure 52 Vue sur les façades de l'atelier A. (source : photo prise par l'auteur.)

3- Un indice d'ouverture de l'atelier A :

L'indice d'ouverture représente le pourcentage de surface vitrée rapportée à la surface du local ; un indice supérieur à 30% se traduit par des risques accrus de surchauffe et d'éblouissement en été (pour les façades exposées.) (B. PAULE, 2007).

Un indice de 20% est généralement suffisant pour offrir une couverture satisfaisante des besoins en lumière naturelle (quantitatif + vues), à condition que l'environnement extérieur et l'orientation ne soient pas trop défavorables

Dans notre cas nous avons calculé le dit indice à l'aide de la formule ci-dessous.

I_v (indice d'ouverture) = Surface vitrée [m²] x 100 / surface du local [m²]. (B. PAULE, 2007).

$I_v = 39.29\text{m}^2 \times 100 / 99 = 39.69\%$ et nous avons arrondi à 40%. Ce taux étant supérieur au seuil admis peut être à l'origine de surchauffe et d'éblouissement.

I-2-2-Atelier B :

C'est un atelier de forme rectangulaire avec une seule façade orientée vers l'Ouest. Il est utilisé comme salle de cours et de dessin.

1-Description de l'intérieur de l'atelier :

Il est d'une superficie de 61.38m² dont le plafond est de couleur blanche et le plancher qui est en carrelage clair. Les murs sont peints en couleur blanc-cassée qui sont placardés d'un tableau blanc et d'un autre tableau vert. Il renferme 14 tables à dessin en bois de couleur marron mat.



Figure 53 vue d'intérieur de l'atelier B (Source : photo prise par l'auteur)

2- Description de la façade :

La seule façade que compte l'atelier B et surmontée de neuf (9) éléments de fenêtres, dont les dimensions de chacune sont de 85cm x 210cm.

La surface cumulée de ces dernières représente 60% de celle de la façade exposée.

Le vitrage utilisé est en verre transparent, qui permet un apport solaire conséquent.



Figure 54 Vue sur la façade de l'atelier B (source : prise par l'auteur.)

Un indice d'ouverture de l'atelier B :

Au même titre que l'atelier A, nous avons calculé l'indice d'ouverture de l'atelier B dont le résultat est 26%, soit un indice inférieur à 30% qui ne présente pas de risque majeur d'éblouissement.

I-2-3-Salle de travaux dirigés C :

C'est une salle de forme rectangulaire avec une seule façade orientée vers le Nord. Elle est destinée aux travaux dirigés d'architecture.

1- Description de l'intérieur de l'atelier :

Elle occupe une superficie de 59.80m² son plafond est de couleur blanche, le plancher est en carrelage blanc, Les murs sont de couleur blanc-cassée dont deux sont placardés de tableaux (un blanc et l'autre vert.). Dans cette salle sont agencées vingt-deux (22) tables de cours de couleur beige légèrement réfléchissant.



Figure 55 vue d'intérieur de la salle td C (Source : photo prise par l'auteur)

2- Description de la façade :

La façade de la dite salle est orientée nord, sa composition est identique à celle de l'atelier B ci-dessus décrite.



Figure 56 Vue sur la façade de la salle td C (Source : photo prise par l'auteur.)

Un indice d'ouverture de la salle de travaux dirigés C :

Le calcul de l'indice de cette salle donne un résultat de 27% ; taux qui signifie l'absence de risque majeur d'éblouissement.

II-Méthodes et outils d'évaluation :

Ce travail nous permettra d'évaluer le confort ou la gêne visuel pouvant découler des différentes orientations des ateliers et la hauteur du soleil.

Pour y parvenir, nous pouvons faire usage d'une série d'outils et de méthodes complémentaires tels que : l'observation, questionnaire, campagne de mesure sur terrain ou la simulation numérique.

II-1-Observation et questionnaire

Observer les usagers des ateliers vise à :

- Identifier leur d'activités ;
- Recenser leur comportement des conditions d'éclairage.

Durant l'observation, un questionnaire a été distribué en vue de vérifier la véracité des résultats de celle-ci d'une part et, de nous permettre d'évaluer quantitativement et qualitativement la perception, la satisfaction, les préférences et le comportement des occupants des trois salles d'autre part.

Le questionnaire est défini comme étant « un instrument de prise de l'information, basé sur l'observation et l'analyse des réponses à une série de questions posées. Cette technique constitue un raccourci précieux quand l'observation directe est impossible, trop coûteuse ou insuffisante.» (A. ROUAG. 2003).

II-2-La prise de mesure :

Pour mieux comprendre le comportement des occupants et les résultats du questionnaire renseigné par ces derniers, une campagne de mesure d'éclairement in situ a été effectuée à l'aide d'un luxmètre tout nous référant à un protocole qui sera expliqué plus loin.

II-3-La simulation numérique :

C'est un des outils utilisés qui consiste à simuler (faire paraître comme réelle une chose qui ne l'est pas) un système/phénomène donné afin d'étudier son fonctionnement, ses propriétés et de prédire ainsi son évolution.

La simulation numérique repose sur la programmation de modèles théoriques ou mathématiques adaptés aux moyens numériques. C'est donc une série de calculs utilisant souvent la technique dite des éléments finis effectuée sur un support matériel "ordinateur" dont les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats par des "images de synthèse". "La notion de simulation fait partie intégrante de la conception architecturale

depuis sa création" (J. LEBAHAR, 1983) ; la simulation de l'éclairage naturel se fait par la simulation de la position du soleil et de la luminance du ciel et l'ajout des dimensions temporelle et géographique.

III- Enquête par questionnaire :

III-1-Présentation du questionnaire :

Le questionnaire remis aux occupants pour renseignement, comportant cinq parties (voir annexe1), vise à nous éclairer sur :

- Les tranches d'âge de l'occupant, leur statut et leur horaire de travail dans l'atelier ;
- Le lieu de présence au moment du renseignement du questionnaire, le type d'activité exercé et l'endroit jugé le plus convenant, du point de vu éclairage, de la dite activité.
- L'appréciation de la lumière naturelle par les occupants de l'atelier ;
- Les gênes découlant des rayons solaires lors de leurs activités (éblouissement, réflexion, etc....) ainsi que les solutions préconisées pour remédier à ces gênes ;
- Les avis des occupants sur l'éclairage artificiel, ainsi que les corrections à apporter en vue d'améliorer éventuellement sa qualité.

III-2-lecture et interprétation des résultats :

Les résultats obtenus par l'exploitation du dit questionnaire ce résumant comme suite :

III-2-1-Tranche d'âge, statut et horaire d'occupation de l'atelier :

Les occupants ayant répondu à notre questionnaire, en nombre de 47 (46 étudiants et un enseignant), sont âgés 20 ans à 25 ans et 37 ans pour l'enseignant. Leurs horaires d'occupation débutent à 9h et se terminent à 16h30.

III-2-2-Emplacement des occupants :

Au moment du renseignement du questionnaire les occupants étaient chacun à sa place habituelle selon l'agencement actuel des tables.

III-2-3-Type d'activité (voir histogramme N°01) :

De cet histogramme N°01, relatif aux réponses concernant l'activité des occupants, on relève que :

L'atelier A, occupé par des étudiants en master 1, les tâches effectuées sont réparties comme suit :

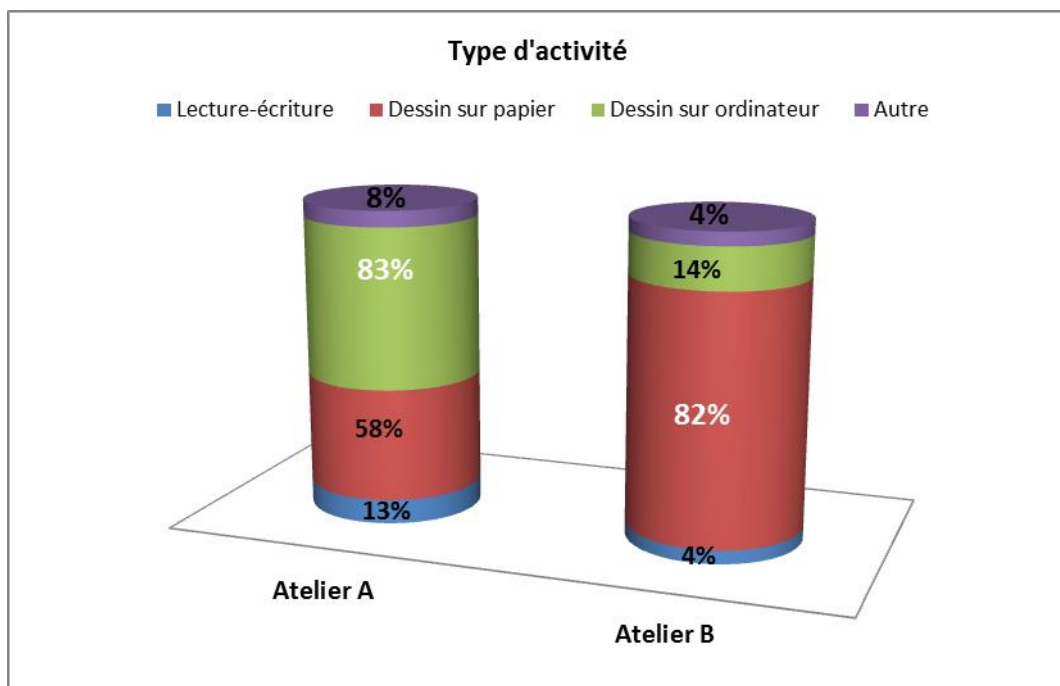
83% dessin sur ordinateur ; 58% dessin sur papier ; 13% lecture-écriture ; 8% autre tâches.

A l'atelier B ; occupé par des étudiants de première année, les tâches effectuées sont réparties comme suit :

82% dessin sur papier ; 14% dessin sur ordinateur ; 4% lecture-écriture et autres tâches.

Au vu de ces taux, nous déduisons que :

- L'atelier A, sert beaucoup plus au dessin sur ordinateur et dessin sur papier. Taches qui nécessitent un éclairage adéquat.
- L'atelier B, est utilisé dans une large proportion comme lieu pour dessin sur papier. Cette activité demande un éclairage plus intense.



Histogramme N° 1 Type d'activité (Source : L'auteur.)

III-2-4-Choix du lieu du travail (voir plan) :

Les occupants des deux ateliers choisissent un lieu pour l'exécution de leurs tâches en fonction de la nature de cette dernière, tel que :

- Proche des fenêtres, quand il s'agit du dessin sur papier en vue d'une meilleure perception des détails ;
- Dans les lieux moins exposés aux rayons solaires quand le travail porte sur ordinateur pour se soustraire aux réflexions sur écran.

- De ces faits, nous déduisons que l'éclairage prévalant dans l'atelier, ne convient pas aux activités des usagers.

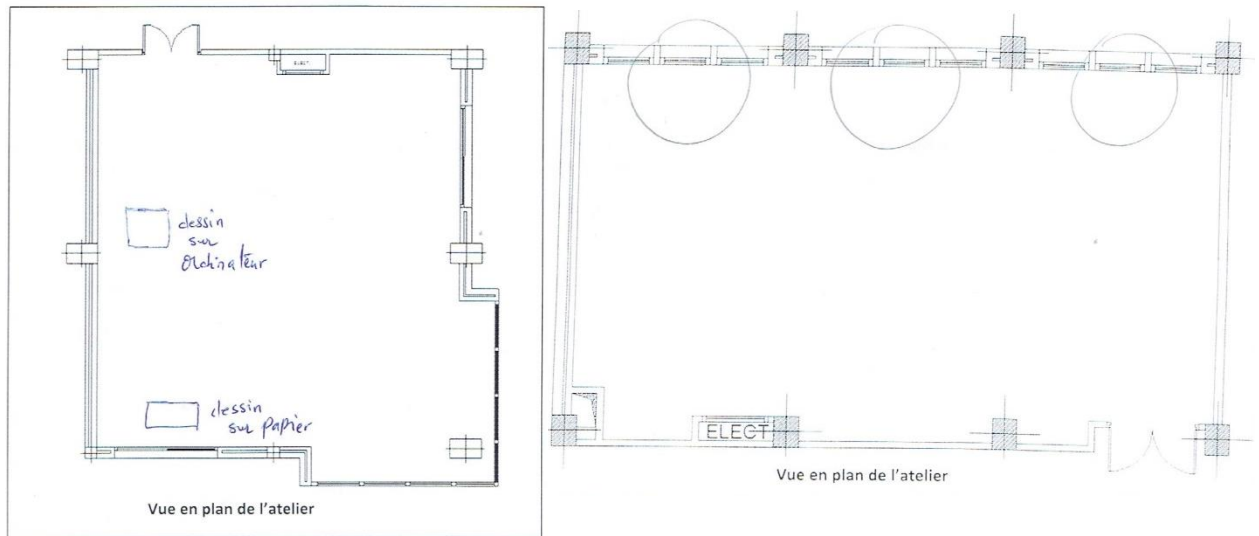


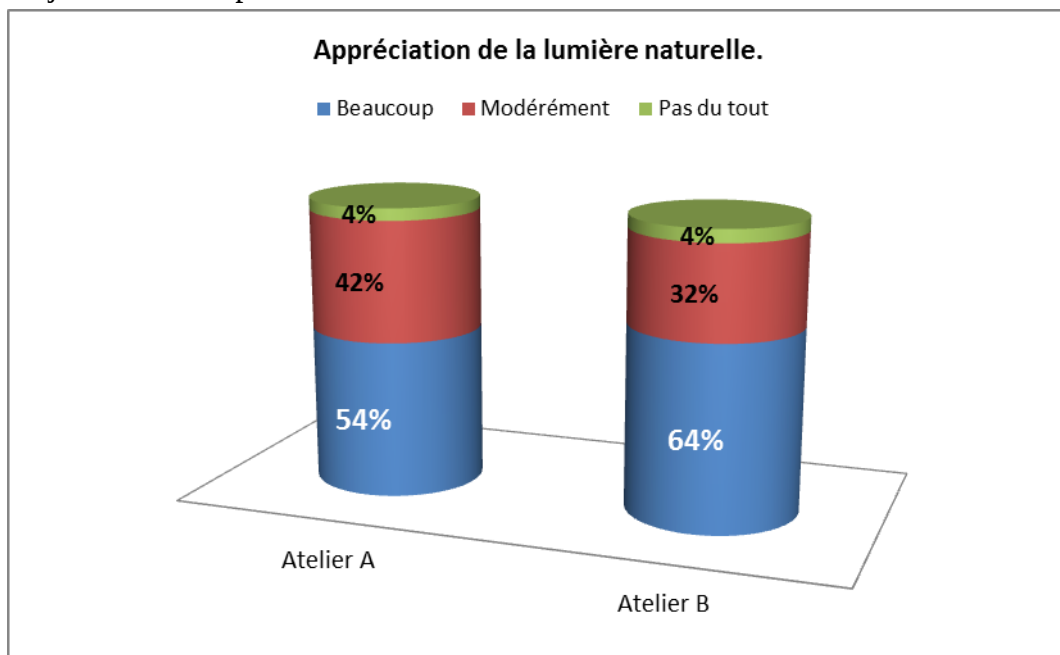
Figure 57 Choix du lieu du travail atelier A et B (Source: l'auteur)

III-2-5-Appréciation de la lumière naturelle dans l'atelier (voir histogramme N°02)

Les degrés d'appréciation de la lumière naturelle par les occupants des ateliers A et B sont reflétés par l'histogramme N°02 à savoir :

- « Beaucoup » a raison de 54% pour l'atelier A et 64% pour le B ;
- « Modérément » dans les proportions 42% pour l'atelier A et 32% pour le B ;
- « Pas du tout » 4% pour les deux ateliers.

A travers les réponses reçues, nous déduisons que l'éclairage naturel est apprécié par la grande majorité des occupants.



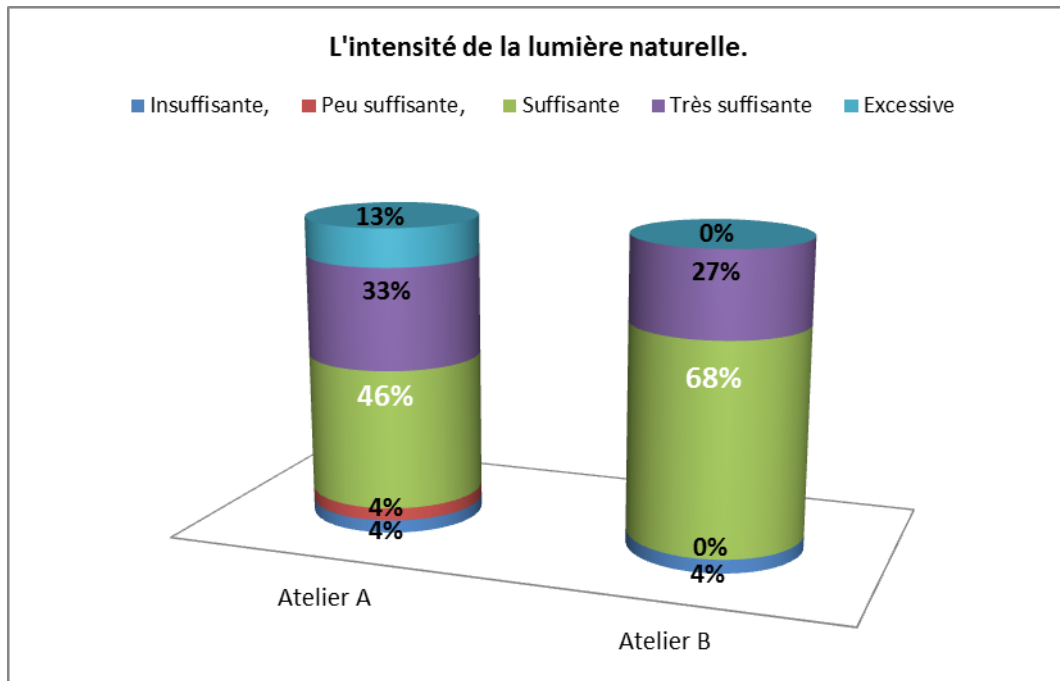
Histogramme N° 2 Appréciation de la lumière naturelle (Source : L'auteur.)

III-2-6-L'intensité de la lumière naturelle dans l'atelier (voir histogramme N°03) :

L'intensité de la lumière naturelle, dans les ateliers étudiés, est estimée par les occupants, dans des proportions éditées dans l'histogramme N°03 à savoir :

- « Insuffisante » par 4% dans chaque atelier ;
- « Peu suffisante » par 4% de l'atelier A ;
- « Suffisante » par 46% de l'atelier A et 68% de l'atelier B ;
- « Très suffisante » par 33% de l'atelier A et 27% de l'atelier B ;
- « Excessive » par 13% de l'atelier A.

L'intensité de la lumière naturelle est estimée « suffisante » à « très suffisante » par la grande partie des occupants des deux ateliers. Estimation que nous allons vérifier par des mesures d'éclairement sur les lieux.



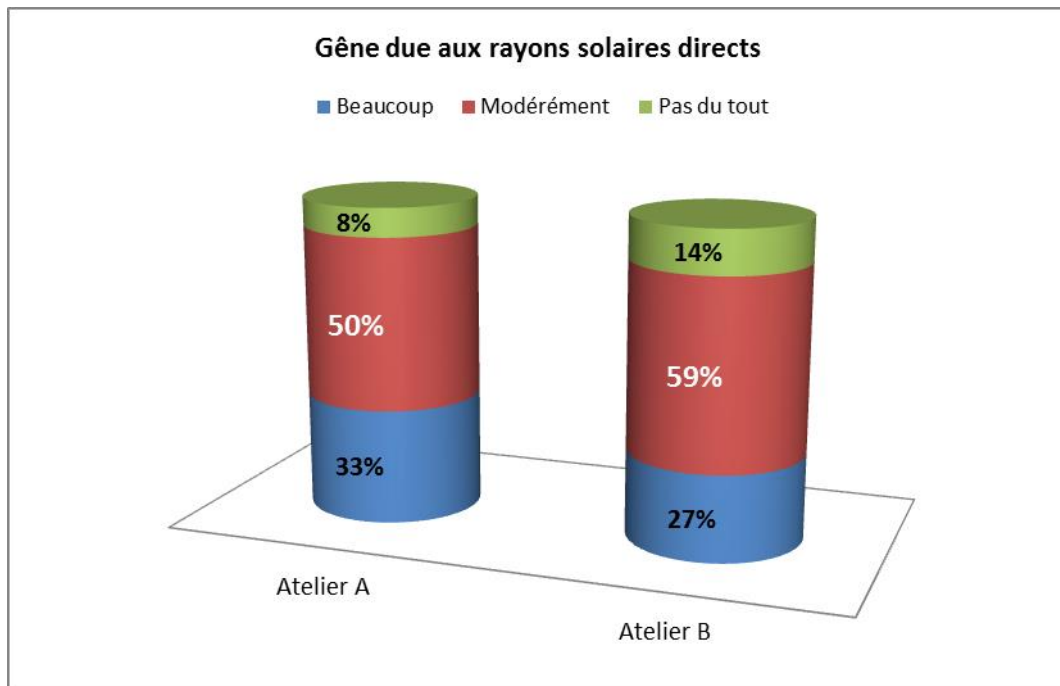
Histogramme N° 3 L'intensité de la lumière naturelle (Source : L'auteur.)

III-2-7-Gêne due aux rayons solaires (voir histogramme N°04) :

Les réponses des occupants des ateliers A et B, concernant la gêne que leur procure les rayons solaires directs, sont traduit par l'histogramme N°04 notamment :

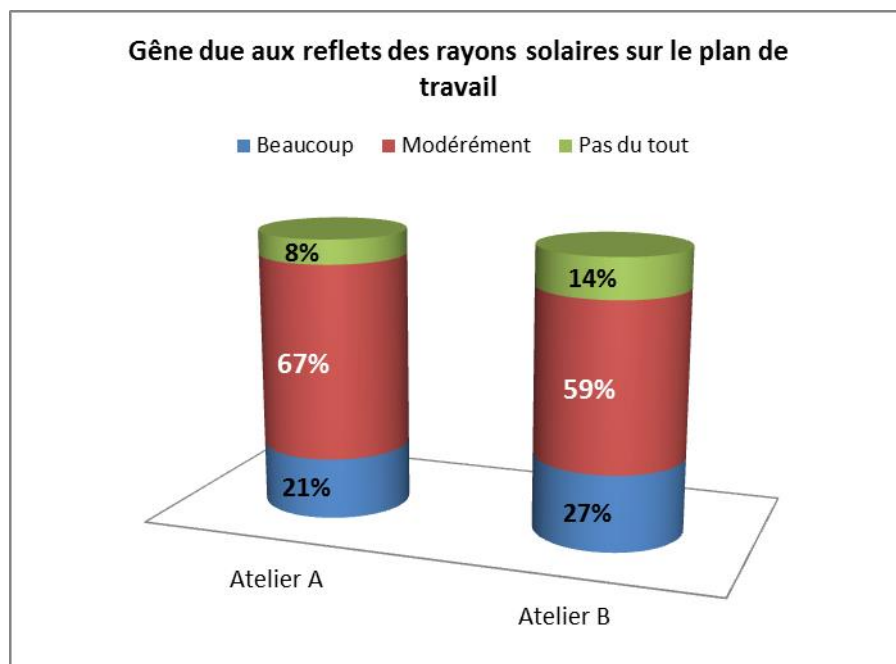
- 33% de l'atelier A et 27% de l'atelier B sont « beaucoup » gênés par ces rayons ;
- 50% de l'atelier A et 59% de l'atelier B n'en sont gênés que « modérément » ;
- 8% de l'atelier A et 14% de l'atelier B ne ressentent « pas du tout » de gêne.

La gêne due aux rayonnements solaires directs est ressentie par la grande proportion des usagers des deux ateliers, d'où nécessité d'y remédier.



Histogramme N° 4 Gêne due aux rayons solaires directs (Source : L'auteur.)

III-2-8-Gêne due aux reflets des rayons solaires sur le plan de travail (papier, calque, ordinateur....) (voir histogramme N°05) :



Histogramme N° 5 Gêne due aux reflets des rayons solaires sur le plan de travail (Source : L'auteur.)

La gêne des occupants des deux ateliers, par les reflets des rayons solaires, est traduite par l'histogramme N°05 à savoir :

- 21% de A et 27% de B sont « beaucoup » gênés par les reflets ;
- 67% de A et 59% de B n'en sont que « modérément » gênés ;
- 8% de A et 14% de B n'en sont « pas du tout » gênés.

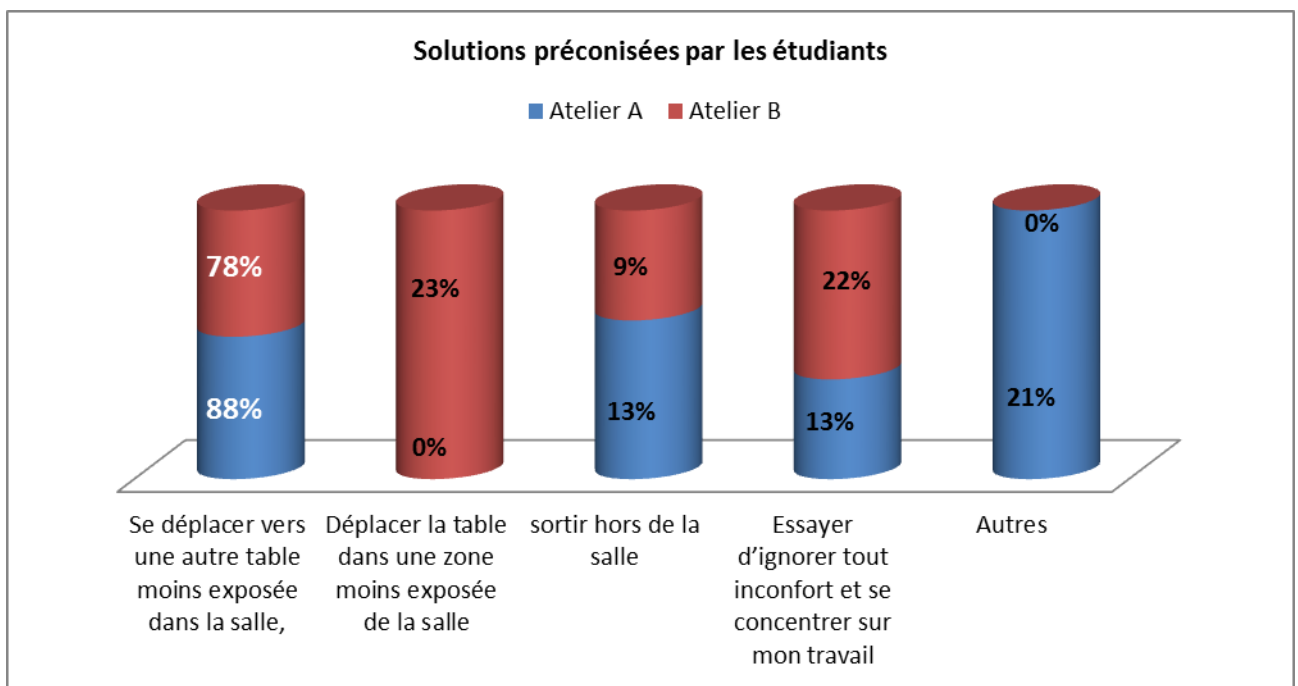
Les gênes dues aux reflets des rayons solaires sont aussi ressenties par la presque totalité des occupants des deux ateliers.

III-2-9-Solutions préconisées par les occupants (voir histogramme N°06) :

Les réponses des étudiants, relatives à la gêne par les rayons solaires, sont traduites par l'histogramme N°02 notamment pour les deux ateliers :

- Les occupants préfèrent changer de table en fonction de la disponibilité de place (88% pour l'atelier A et 78% pour l'atelier B) ; déplacer leur table le cas échéant (23% pour l'atelier B) ou travailler hors de l'atelier (13% pour l'atelier A et 9% pour l'atelier B.) ;
- 13% des occupants de l'atelier A et 22% du B essayent d'ignorer tout inconfort en se concentrant sur leurs travaux,
- 21% des occupants de l'atelier A ont opté pour la couverture des vitre claire par du papier à dessin.

En conclusion, il ressort clairement, au vue de l'avis majoritaire des occupants, que changement de place est la plus adoptée dans les deux ateliers (A et B) en cas de gêne.



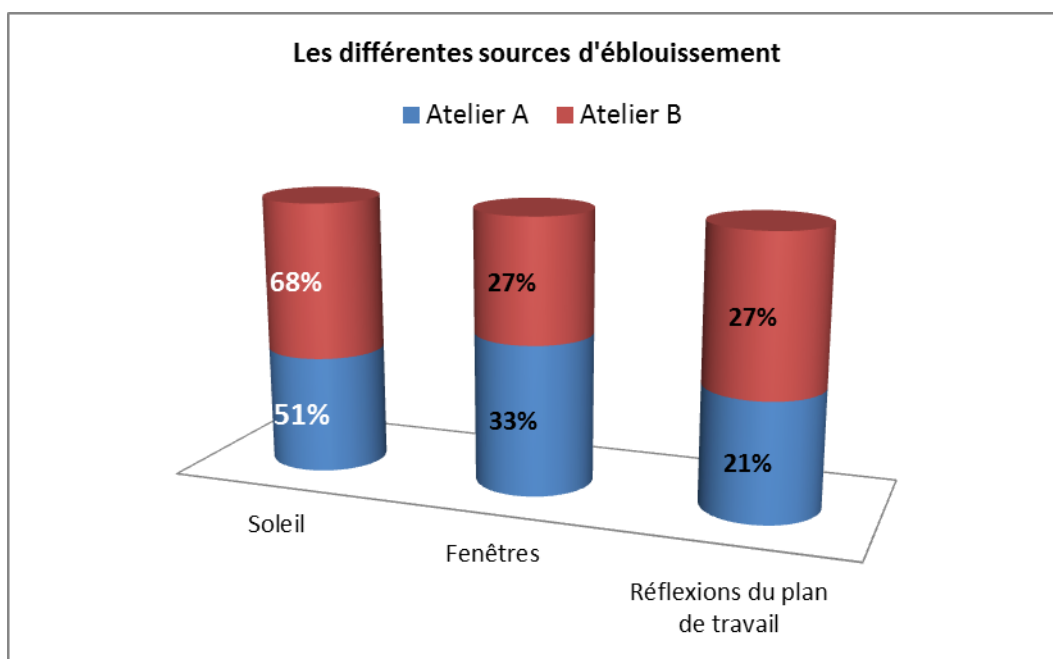
Histogramme N° 6 Solutions préconisées par les étudiants (Source : L'auteur.)

III-2-10-Sources d'éblouissement (voir histogramme N°07) :

En réponse à notre questionnaire, les occupants des ateliers étudiés nous ont fait part de trois (3) sources d'éblouissements, les quelles sont mises en évidence à travers l'histogramme 07 ci-dessus, à savoir :

- 51% de l'atelier A et 68% de l'atelier B sont éblouis par le « soleil ».
- 33% de l'atelier A et 27% de l'atelier B sont éblouis par les « fenêtres ».
- 21% de l'atelier A et 27% de l'atelier B sont éblouis par les « réflexions du plan de travail ».

Les réponses données à notre question imposent des solutions radicales pour mettre un terme au problème des éblouissements et leurs sources.

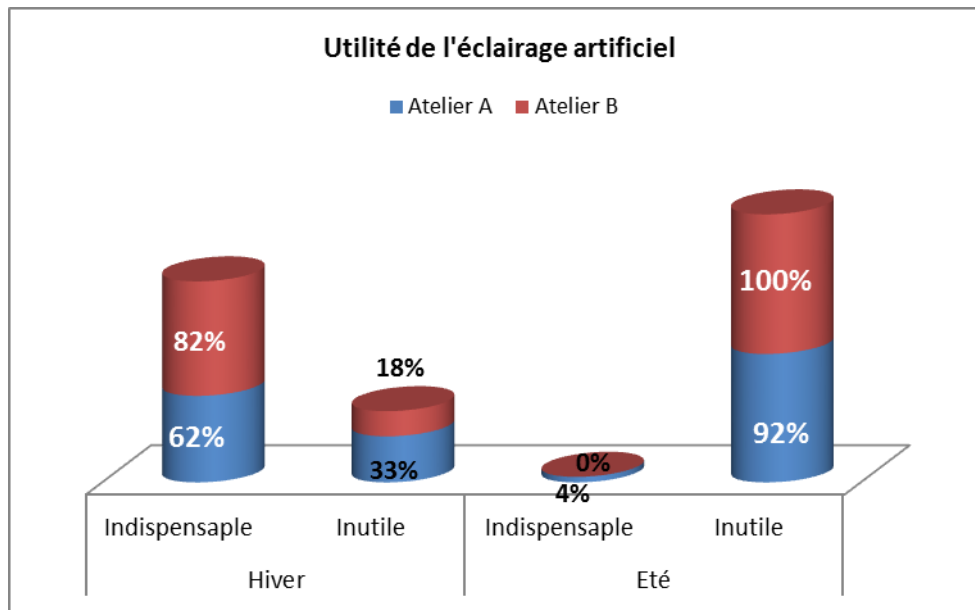


Histogramme N° 7 Les différentes sources d'éblouissement (Source : L'auteur.)

III-2-11- Utilité de l'éclairage artificiel (voir histogramme N° 08) :

L'histogramme N°08 fait état des réponses des occupants à nos questions sur l'éclairage artificiel notamment :

- En hiver, 62% des occupants de l'atelier A et 82% de l'atelier B, jugent que l'éclairage artificiel est « Indispensable ». Par contre, respectivement 33% et 18% des mêmes ateliers trouvent cette éclairage « Inutile » ;
- En été, en revanche, seulement 4% des occupants de l'atelier A estime que l'éclairage artificiel est « Indispensable ». en contrepartie, 100% des usagers de ceux l'atelier B et 92 % de l'atelier A considèrent « Inutile » le dit éclairage.



Histogramme N° 8 Utilité de l'éclairage artificiel (Source : L'auteur.)

III-2- Conclusion du questionnaire :

Les avis des occupants, recueillis à travers notre questionnaire, offrent des réponses diversifiées par rapport aux valeurs tangibles à savoir :

- Contradictoire ;
- Mitigées ;
- Correspondantes avec ces dernières.

- Questions Réponses	Appréciation de la lumière Naturelle		Gênes dues aux rayons solaires directs		Gênes dues aux reflets des rayons solaires	
	Atelier A (%)	Atelier B (%)	Atelier A (%)	Atelier B (%)	Atelier A (%)	Atelier B (%)
Beaucoup	45	64	33	27	21	27
Modérément	42	32	50	59	67	59
Pas du tout	4	4	8	14	8	14

Tableau 9 Tableau résumant les réponses des occupants des ateliers A et B (Source : L'auteur.)

Ce tableau, résumant les réponses des occupants des ateliers A et B à notre questionnaire, nous indique que :

- 87% de l'atelier A et 96% de l'atelier B apprécient la présence de la lumière naturelle, alors qu'en même temps, une grande proportion d'entre eux trouvent gênants les rayons solaires directs (83% de l'atelier A et 86% de l'atelier B) ainsi que leurs reflets (88% de l'atelier A et 86% de l'atelier B), d'une part ;
- D'autre part, toutes les fenêtres, à vitrage transparent de l'atelier A, ont été couvertes par du papier cartonné gris pour réduire la pénétration de la lumière naturelle. Ces deux situations contradictoires relèvent la forme subjective donnée à nos réponses.

Local	Sources d'éblouissements			Solutions préconisées par les occupants				
	Soleil	Fenêtres	Reflets du plan de travail	Changer de table	Déplacer la table	Sortir de la salle	Ignorer les gênes	Autres
Atelier A	51%	33%	21%	88%	Néant	13%	13%	21%
Atelier B	68%	27%	27%	78%	23%	9%	22%	Néant

Tableau 10 tableau résumant les réponses des occupants des ateliers A et B (Source : L'auteur.)

De la lecture de ce tableau qui résume la liaison entre les éblouissements et les solutions prises par les occupant pour s'en protéger, il ressort que :

- Les usagers des deux ateliers malgré leur appréciation de la lumière naturelle (voir tableau N°10), semblent être éblouies par le soleil à travers diverses sources ;
- A l'effet de se soustraire à cette forme de gêne la majorité des occupants se contente de changer de table.

Si l'on compare les données des deux tableaux (N°9et N°10) nous relevons là aussi des contradictions dans les réponses notamment dans celles portant sur la gêne découlant du soleil.

En ce qui concerne l'appréciation de l'éclairage artificiel, la majorité des usagers des deux ateliers A et B jugent ce dernier « inutile »en été et « indispensable » en hiver ; réponse qui nous semble concordante avec la réalité.

IV-Compagne de mesure :

IV-1-Mesures photométriques des ateliers étudiés :

Toute en menant notre étude, il nous est apparu indispensable de mesurer l'éclairement prévalant dans les ateliers choisis (A, B et C) en vue de :

- Situer l'état des lieux par rapport aux normes disponibles ;
- Confronter les résultats aux réponses des occupants ;
- Faire une comparaison avec les résultats d'une simulation numérique.

Pour ce faire, nous ferons usage d'un luxmètre (référéncié C.A 813 light-mètre¹¹) en nous référant à la méthode arrêtée dans la norme NBN L-14 002.

IV-1-1-Description et fonctionnement du luxmètre utilisé :

Le luxmètre est un appareil destiné à la mesure des éclairagements lumineux exprimés en lux (lux). Il est constitué de trois parties principales : une tête photométrique qui reçoit le rayonnement à mesurer, un transducteur qui convertit le signal reçu de la tête photométrique en indication exploitable et d'un afficheur qui indique la valeur de l'éclairement mesuré en lux (J. BASTIE 2003).

Il permet de mesurer simplement et rapidement l'intensité lumineuse sur le lieu de travail, il permet aussi de déterminer l'éclairement moyen général dans un local, qui correspond à la moyenne des éclairagements relevés en un certain nombre de points significatifs du local.

- 1 Capteur.
- 2 Afficheurs numérique.
- 3 Poussoir 2 fonctions : Appui bref : activation/désactivation du rétro-éclairage de l'affichage. Appui long : Poussoir de commande de la valeur crête.
- 4 Poussoir de commande de maintien d'affichage de la dernière Mesure.
- 5 Choix de la gamme de mesure employée.
- 6 Commutateur linéaire 3 positions :
 - OFF : Mise hors circuit de l'appareil
 - lux : Unité de mesure d'éclairement
 - fc : Unité de mesure d'éclairement anglo-saxonne (footcandles).

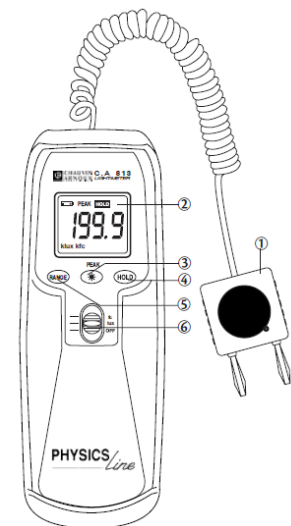


Figure 58 : Composants du luxmètre
(Source: manuel d'utilisation du luxmètre)

¹¹ Le luxmètre a été mis à notre disposition par un enseignant au niveau de la faculté génie électrique et électronique.

IV-2-Procédure de mesures :

Deux types de mesures sont à effectuer (A. TIBERGUE, 2007) :

1. Déterminer l'éclairement moyen général dans le local qui correspond à la moyenne des éclairements relevés en un certain nombre de points significatifs du local, la cellule du luxmètre étant placée horizontalement à la hauteur du plan utile.
2. Vérifier au poste de travail le niveau d'éclairement en plaçant la cellule au niveau des détails et des objets qui doivent être vus pour que la tâche puisse être exécutée, le travailleur étant à son poste dans sa position habituelle. La personne effectuant la mesure doit veiller à ne pas modifier par sa présence l'éclairement du poste de travail.

Selon la norme NBN L 14 – 002, Pour déterminer le niveau d'éclairement moyen d'un local à l'aide d'un luxmètre, il y a lieu de :

1- Calculer l'indice « K » du local qui déterminera le nombre minimum de mesure (selon le tableau ci-dessous).

L'indice « k » se calcule par la formule :

$$k = \frac{a * b}{h * (a + b)}$$

A et b = largeur et longueur du local ;
h = hauteur du local.

K	Nbre minimum de points de mesure
moins de 1	4
1... 1,9	9
2... 2,9	16
3 et plus	25

Tableau 11 L'indice « k » (Source : <http://www.energieplus-lesite.be/>)

2- Diviser la surface du local en rectangle élémentaire de dimension égales ;

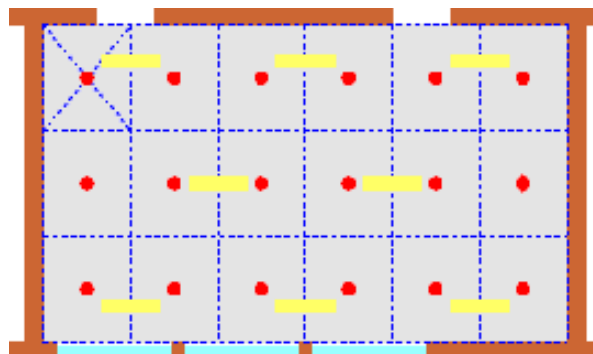


Figure 59 Division du local (Source : <http://www.energieplus-lesite.be/>)

3- Mesurer l'éclairement ponctuel au centre de chaque rectangle ;



Figure 60 La prise de mesure à l'aide d'un luxmètre (Source : photo prise par l'auteur.)

4- Déterminer une moyenne arithmétique des valeurs d'éclairements relevés à l'aide de la formule suivante :

$$Emoy = (E1 + E2 + ... + En) / n.$$

IV-3-Prise de mesures :

1- Calcule de l'indice « k » des locaux étudiés :

a- atelier A: a=9,76m, b=9,78, h=3,20m.

$$k = \frac{9.76 * 9.78}{3,20 * (9.76 + 9.78)} = 1.53$$

Nombre relevé minimums = 9 => nombre de mesures réalisées 10 mesure.

b- Atelier B: a=6,00m, b=10,23m, h=3,20m.

$$k = \frac{6 * 10,23}{3,20 * (6 + 10,23)} = 1.18$$

Nombre relevé minimums = 9=> nombre de mesures réalisées 10 mesure.

c- Salle TD C: a=5,95m, b=10,05m, h=3,20m.

$$k = \frac{5,95 * 10,05}{3,20 * (5,95 + 10,05)} = 1.17$$

Nombre relevé minimums = 9=> nombre de mesures réalisées 10 mesure.

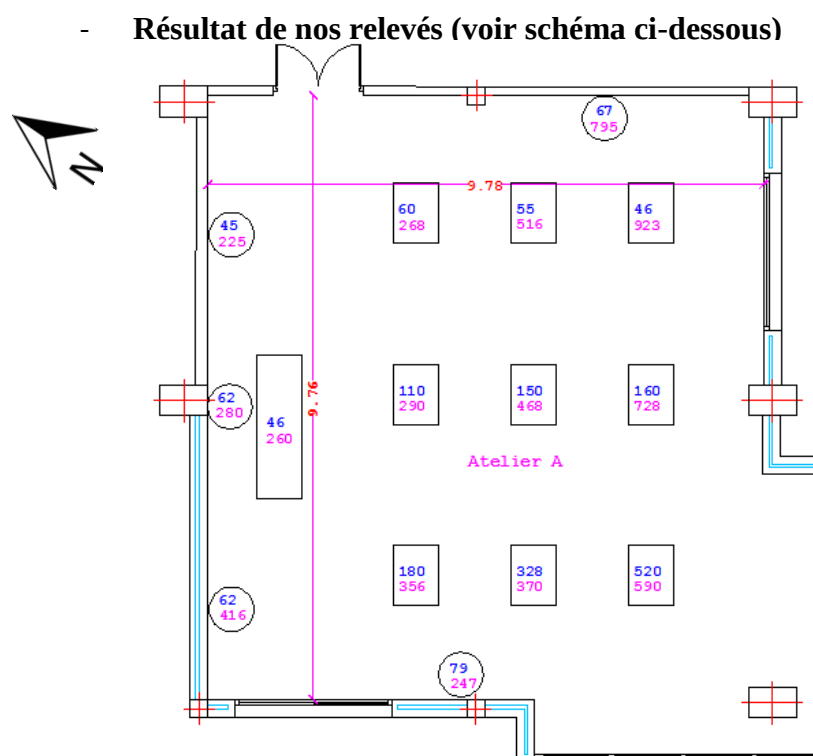
2- Mesure des éclairements ponctuels :

Au préalable, nous signalons que les mesures des ateliers B et C ont été effectuées le 04 juillet 2016 à partir de 11h30.

Les mesures de l'atelier A, suite à sa fermeture à clé le 04 juillet 2016, n'ont été effectuées que le 16/07/2016. Toutes nos mesures ont été relevées en respect aux principes de la procédure cités au point « B ».

a- Mesures de atelier A :

Au préalable, nous signalons que les mesures de cette atelier ont été effectués le 16 juillet 2016 à 10h45, suite à sa fermeture à clé le 04 juillet 2016, jour du relevé des éclairéments des autres salles (B et C). Toutes nos mesures ont été effectuées en respect aux principes de la procédure cités au point « B ».



Légende :

- Chiffres en bleu ■ Mesures effectuées fenêtres fermées dont le vitrage est couvert en papier gris (mis en place par les étudiants) ;
- Chiffre en magenta ■ Mesures effectuées en ayons les fenêtres ouvertes ;
- Chiffres à l'intérieur des cercles ○ Mesures prises au niveau des tableaux d'affichage placardés sur les murs.

Niveau d'éclairage avec fenêtre fermées et papier de couleur grise sur le vitrage

$$Emoy = (E1 + E2 + \dots + En) / n$$

$$Emoy = (46 + 46 + 55 + 60 + 110 + 150 + 160 + 180 + 328 + 520) / 10$$

$$Emoy = 165 \text{ lux}$$



Figure 61 vue d'intérieur de l'atelier A "fenêtres fermées" (Source : photo prise par l'auteur.)

Niveau d'éclairement avec fenêtre ouvertes

$$Emoy = (E1 + E2 + \dots + En) / n$$

$$Emoy = (260 + 268 + 516 + 923 + 290 + 468 + 728 + 356 + 370 + 590) / 10$$

$$Em = 477 \text{ lux}$$



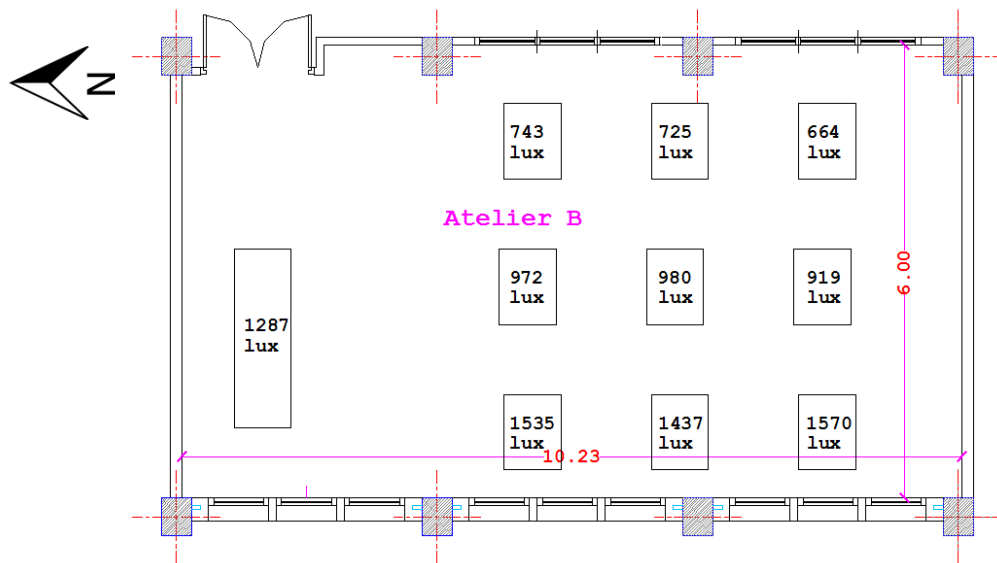
Figure 62 vue d'intérieur de l'atelier A "fenêtres ouvertes" (Source: photo prise par l'auteur.)

b- Atelier B :

Le 04/07/2016.

Les mesures ont été prises dans cette salle et en cette date du 4 juillet 2016, à 11h30 les fenêtres fermées.

- **Résultat de nos relevés (voir schéma ci-dessous)**



Détermination du niveau d'éclairément :

$$Emoy = (E1 + E2 + \dots + En) / n$$

$$Emoy = (743 + 972 + 1535 + 725 + 980 + 1437 + 664 + 919 + 1570 + 1287) / 10$$

$$Emoy = 1083 \text{ lux}$$

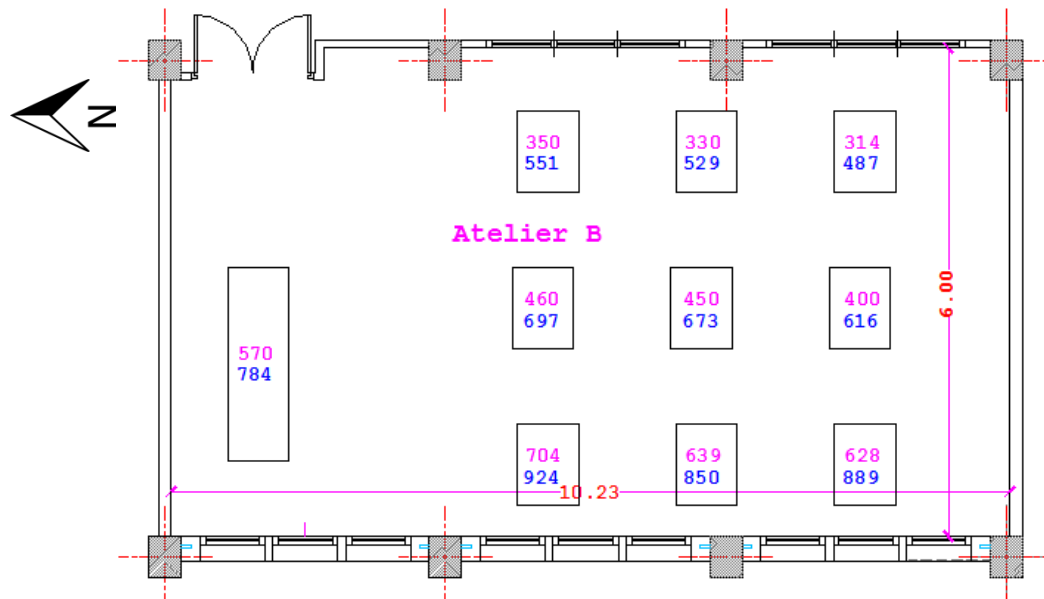


Figure 63 Vue d'intérieur de l'atelier B "sans rideau" (Source : Photo prise par l'auteur.)

Le 16/07/2016

Avant d'effectuer nos mesures en cette date du 16 juillet 2016, nous avons couvert d'un rideau blanc les deux tiers de la hauteur des fenêtres de l'atelier dont le vitrage n'est pas couvert de papier comme l'atelier A. Pour comparer l'éclairément du dit atelier en ayant les fenêtres sans protection et le rideau tiré nous avons effectué une mesure pour chaque situation.

- **Résultat de nos relevés (voir schéma ci-dessous)**



Légende :

- Chiffres en bleu ■ Mesures effectuées fenêtres fermées sans rideau;
- Chiffre en magenta ■ Mesures effectuées fenêtres fermées et rideau tiré;

$$Emoy = (E1 + E2 + \dots + En) / n$$

$$Emoy = (570 + 350 + 330 + 314 + 460 + 450 + 400 + 704 + 639 + 628) / 10$$

$$Emoy = 484.5 \text{ lux}$$

Niveau d'éclairement avec fenêtre fermées sans rideau :

$$Emoy = (E1 + E2 + \dots + En) / n$$

$$Emoy = (784 + 551 + 529 + 487 + 697 + 673 + 616 + 924 + 850 + 889) / 10$$

$$Em = 691 \text{ lux}$$



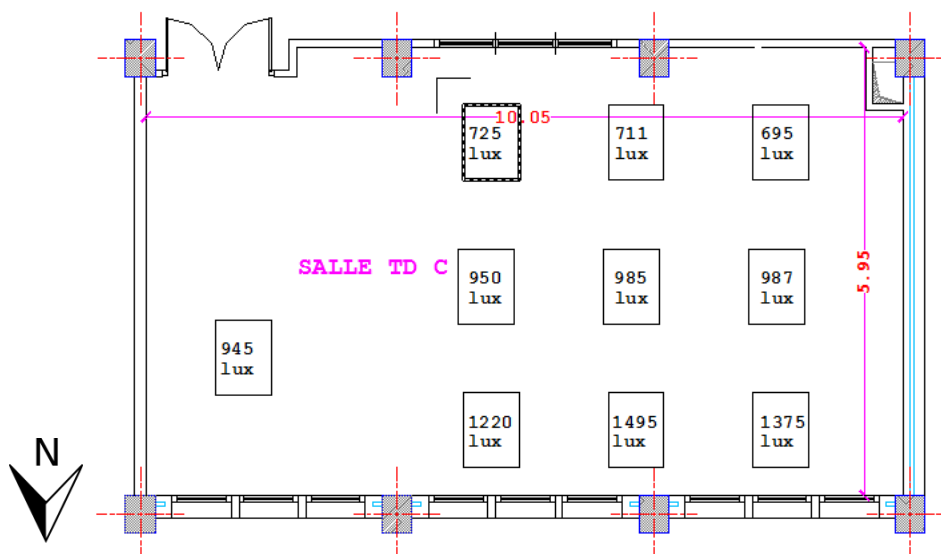
Figure 64 Vue d'intérieur de l'atelier B "rideau tiré" (Source : Photo prise par l'auteur.)

c- Salle de TD C

Nous rappelons que les travaux effectués dans cette salle portent juste sur la lecture et l'écriture.

Les mesures de l'éclairement de la dite salle ont été réalisées le 04 juillet 2016 à 12h00

- Résultat de nos relevés (voir schéma ci-dessous)



Détermination du niveau d'éclairement :

$$E_{moy} = (E_1 + E_2 + \dots + E_n) / n$$

$$E_{moy} = (945 + 725 + 711 + 695 + 950 + 985 + 987 + 1220 + 1495 + 1375) / 10$$

$$E_{moy} = 1009 \text{ lux.}$$



Figure 65 Vue d'intérieur de la salle td C (Source : Photo prise par l'auteur.)

IV-3- Comparaison des résultats :

Comme prévu dans notre objectif arrêté dans le paragraphe titré « mesures photométrique des ateliers étudiés », à travers le tableau récapitulatif ci-après, nous avons

soumis à comparaison les résultats obtenus aux normes européennes, que nous retenons pour leurs explicité.

local	Situation des fenêtres	Eclairage mesuré		Eclairage moyen calculé (lux)	Avis des occupants sur l'intensité de la lumière naturelle	Norme européenne EN 12464 (lux)
		MAXI (lux)	MINI (lux)			
Atelier A	Fenêtres fermées et vitrage recouvert de papier	520	46	166	Excessive pour 13% Suffisante et très suffisante pour 79%	Salle d'art dans les écoles des beaux-arts : 750
	Fenêtres ouvertes	590	260	477		Salles de dessin industriel : 750
Atelier B	Fenêtres fermées rideau tiré	704	314	485	Suffisante et très suffisante pour 95%	Salle de travaux pratique et laboratoire : 500
	Fenêtres fermées sans rideau	924	487	691		Salle de travail manuel : 500
	Fenêtres fermées sans rideau (le 04/07/2016)	1570	664	1083		Ateliers d'enseignement : 500
Salle C	Fenêtres fermées sans rideau (le 04/07/2016)	1495	695	1009	Salle non concernée par le questionnaire	

Tableau 12 Comparaison des résultats aux normes (Source : l'auteur)

N.B : Nous notons au préalable que les valeurs maximales et minimales figurant sur le tableau ont été mesurées respectivement près des fenêtres et loin de celle-ci

Cette façon de procéder nous a permis de remarquer la dégradation de la qualité de l'éclairage au fur et à mesure qu'on s'éloigne des fenêtres, raison pour laquelle les ateliers comportent des coins sombres.

La lecture des diverses données figurants dans ce tableau nous déduisons que :

Concernant l'atelier A en référence à la norme retenue fixant les niveaux d'éclairage entre 500 et 750 lux le dit atelier :

- Est insuffisamment éclairée quand les fenêtres sont fermées. Cet état de fait découle du vitrage obstrué par du papier d'une couleur absorbante de lumière et de la couleur bleu du mur-rideau.

- Par contre en ayant les fenêtres ouvertes l'éclairage de l'atelier est proche de la valeur normalisé.

Quant à l'atelier B son éclairage :

- En ayant les fenêtres fermées et avec ou sans rideaux, les valeurs obtenues sont, dans les deux cas, proches de la norme (500lux) ; seulement la présence du rideau réduit sensiblement l'éblouissement.

- par rapport à la norme, le niveau d'éclairement de 1083 lux, mesuré en ayant les fenêtres fermées et sans rideau, pris à un horaire proche de midi, est excessif (risque d'éblouissement).

La salle TD C, où le niveau d'éclairement a été relevé à un horaire proche de midi, en ayant les fenêtres et sans rideau compte un éclairage excessif (1009 lux).

V-Simulation numérique :

Contenu de son aspect variable, durant une journée ou à longueur de l'année, l'éclairage naturel d'un local ne peut être évalué judicieusement qu'en mobilisant des moyens conséquents et du temps.

Faite dès ses deux paramétrés, nos mesures n'ont pu être effectuées dans des conditions adéquate (décembre /janvier et juin/juillet).

Aussi, soucieux de conforter les résultats de nos travaux nous avons jugé nécessaire de compléter notre étude par une simulation numérique. Afin de comparaison avec nos mesures.

V-1 présentation du logiciel utilisé :

Autodesk ECOTECH analyse est un outil d'analyse de l'environnement qui permet aux concepteurs de simuler la performance des bâtiments dès les premières étapes de conception. Il associe un modèleur 3D avec des analyses solaires, thermiques, acoustiques et de coût. ECOTECH est un outil d'analyse simple et qui donne des résultats très visuels.

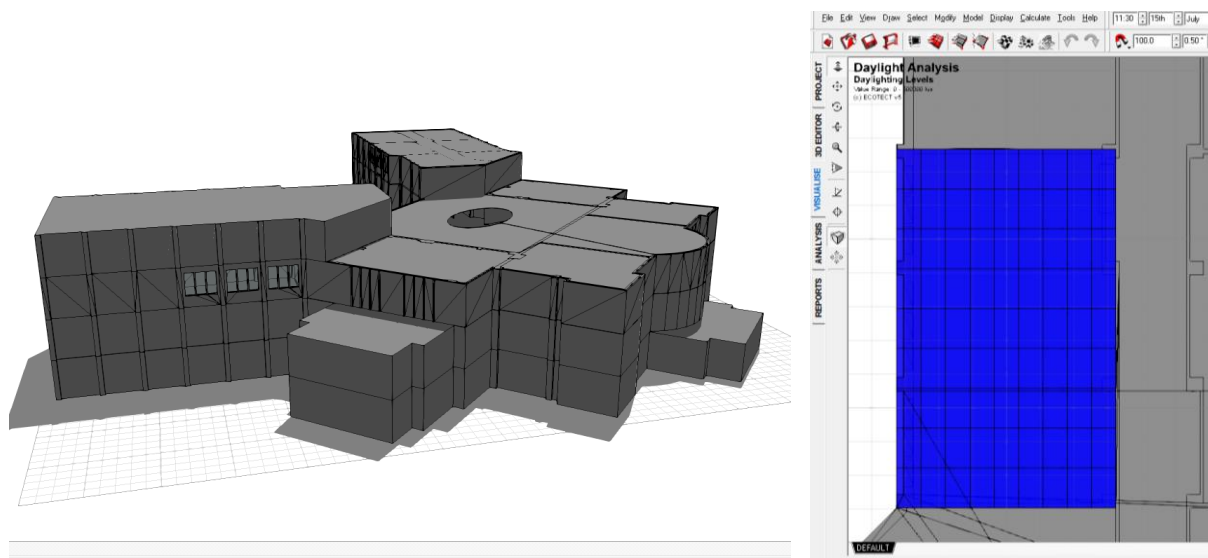
Le but de cette simulation c'est dans un premier temps comparer les résultats fournis par le logiciel avec les données recueillies sur le terrain, pour qu'ensuite évaluer les niveaux de l'éclairage naturelle dans les conditions les plus défavorables à savoir en hiver avec un ciel couvert (des données qu'on ne pouvait pas avoir sur le terrain faute de temps)

Les simulations concernant qu'un seul atelier à savoir l'atelier B.

V-2 Modélisation des ateliers et Les grilles de résultats :

Après avoir importé le modèle 3D du logiciel 3ds max vers Ecotect analysis 2011, nous avons paramétré la grille d'analyse de sorte à avoir des informations sur l'éclairement à 100 cm du sol, ce qui correspond à la hauteur du plan de travail.

Les résultats représentent le niveau d'éclairement moyen annuel incident sur cette grille, ainsi que l'ensoleillement annuel résultant sur cette grille. Les résultats sont exprimés de façon visuelle pour apprécier l'espace dans son ensemble, pour les niveaux d'éclairement nous avons ajouté des points sur la grille qui correspondent aux centres des tables d'atelier.



Une fois nos outils d'évaluation préparés et calibrés, nous les mettons en action dans les trois ateliers pour en extraire les résultats suivant :

V-2-1- Conditions semblables à celles de la campagne de mesures :

Dans ce cas de figure nous avons effectué notre simulation sur uniquement l'éclairage naturel dans des conditions semblables à celles du jour où on a pris les mesures à savoir :

-Localisation et jour et heure de la simulation

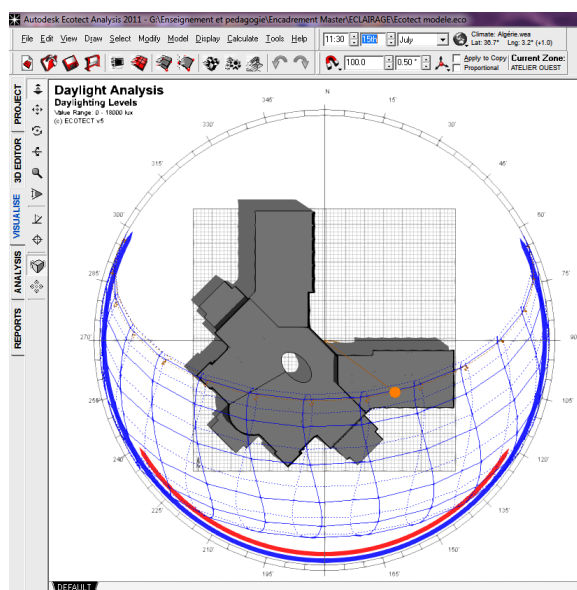


Figure 66 Représentation du modèle 3D dans le diagramme solaire de Tamda le 15 juillet à 11h30 (latitude 36.4° et longitude 4.1°) source : Autodesk Ecotect Analysis 2011

-Ciel d'été dégagé avec un éclairement de 20 000 lux

Des valeurs qui correspondent le plus au ciel du jour ou nous avons effectué les mesures

Autodesk Ecotect - Calculation Wizard...

I lighting analysis I STEP 4 OF 7 Tool Hints ☐ HELP!

DESIGN SKY ILLUMINANCE

Design Sky values are derived from a statistical analysis of outdoor illuminance levels. They represent the horizontal illuminance that is exceeded 85% of the time between 9am and 5pm throughout the working year. Thus they offer a WORST-CASE scenario that you can design to and be sure you meet desired light levels at least 85% of the time.

The Design Sky you enter here is simply multiplied by the Daylight Factor at each calculation point to determine the actual daylight level.

WHAT IS THE DESIGN SKY FOR YOUR SITE ?

Design Sky Illuminance

If you know the design sky illuminance for your site, enter it in the text box immediately below. Otherwise, this value can be derived from the current latitude of your site (for more information, see the help file).

20000 lux

Sky Luminance Distribution Model

This setting determines how available natural light is distributed over the sky dome. Strictly speaking you should always use the CIE Overcast Sky option to obtain worst-case design values unless you are absolutely sure that the other is more appropriate.

☐ CIE Overcast Sky Condition (Recommended)

☒ CIE Uniform Sky Condition

Skip Wizard ☐ Always skip this wizard. << Back Next >> Cancel

-Netteté et état des vitrages moyen (facteur de netteté : *Average=0.9*)

Autodesk Ecotect - Calculation Wizard...

I lighting analysis I STEP 5 OF 7 Tool Hints ☐ HELP!

ROOM-BASED SETTINGS

NOTE: Room settings only apply to the internally reflected component for points actually inside an enclosed space.

Daylight factors for internal points depend on two factors; the size and location of windows, and the reflectivity of internal surfaces.

The BRE Daylight Factor method uses a simplified formula for internal reflections, based on the total area of glazing, its relative cleanliness and differences in the reflectance of high/low level surfaces.

WHAT ROOM-BASED SETTINGS SHOULD USED ?

Window Cleanliness

Windows in many environments are likely to be exposed to a gradual accumulation of dirt. Use the following item to select the likely cleanliness of model windows, and the corresponding reduction in transmittance.

Average (x 0.90)

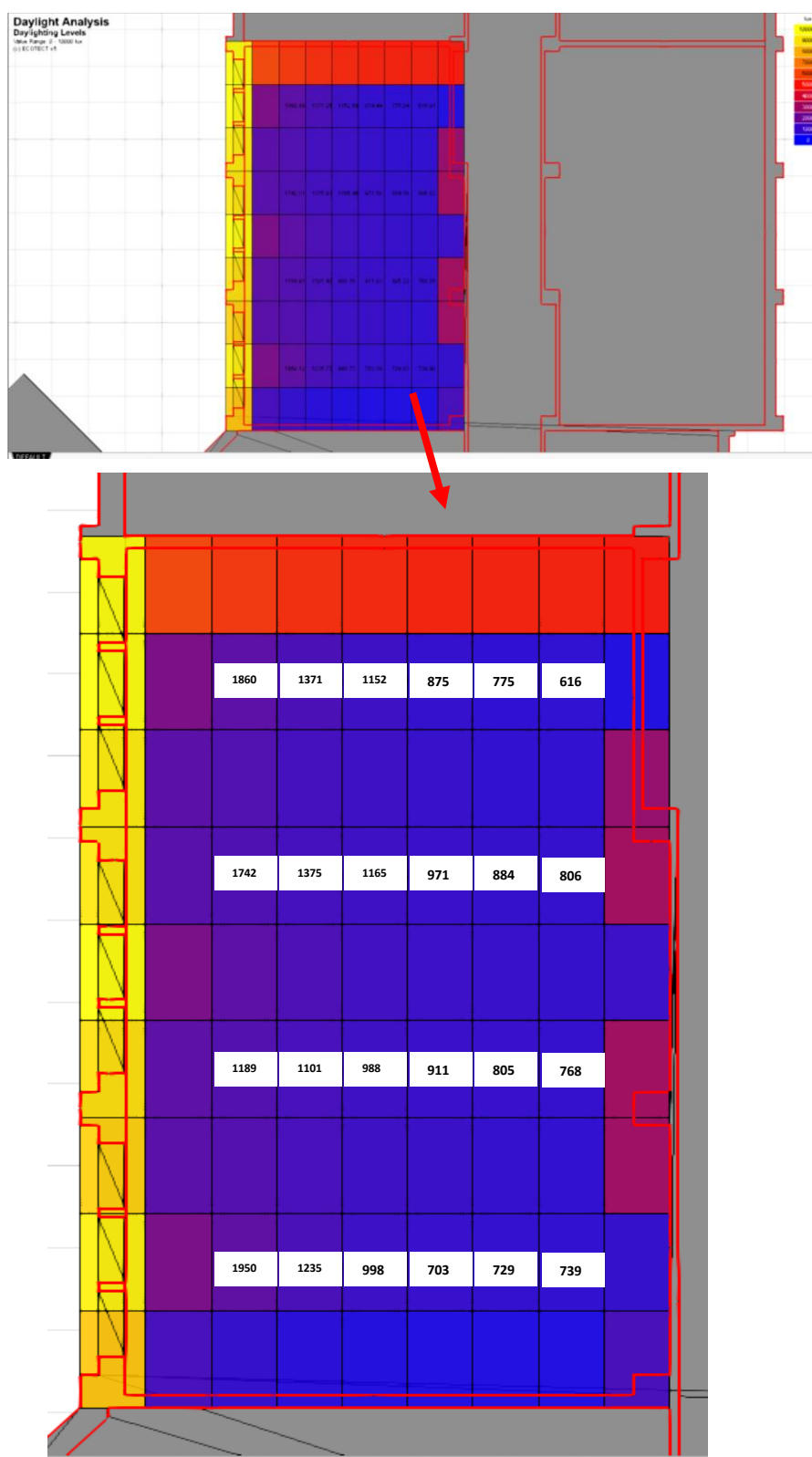
Room-Averaged Window Areas

Internal reflections depend on the ratio of window to overall surface area in each room. Without a room-averaged window area, some points may not be able to 'see' any windows, so will report a zero daylight factor.

☒ Calculate Room-Averaged Window Areas

Skip Wizard ☐ Always skip this wizard. << Back Next >> Cancel

Résultat :



Les résultats obtenus par la simulation numérique correspondent aux résultats pris lors de la campagne de mesure en mois de juillet.

V-2-2- Conditions défavorables (hiver, ciel couvert)

Dans ce cas de figure nous avons effectué notre simulation dans des conditions semblables à celles d'un jour d'hiver à savoir :

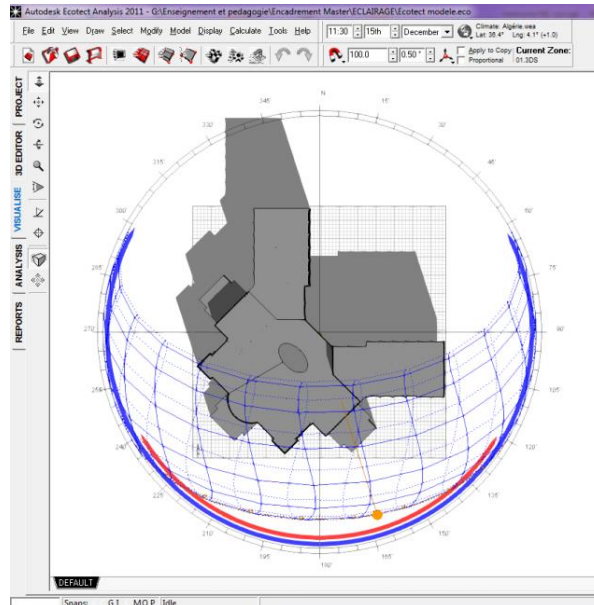


Figure 67 Représentation du modèle 3D dans le diagramme solaire de Tamda le 15 décembre à 11h30 (latitude 36.4° et longitude 4.1°) source : Autodesk Ecotect Analysis 2011 .

-Ciel d'hiver couvert avec un éclairement de 5 000 lux

Des valeurs qui correspondent au ciel d'un jour d'hiver

Autodesk Ecotect - Calculation Wizard...

I lighting analysis I STEP 4 OF 7 Tool Hints **HELP!**

DESIGN SKY ILLUMINANCE

Design Sky values are derived from a statistical analysis of outdoor illuminance levels. They represent the horizontal illuminance that is exceeded 85% of the time between 9am and 5pm throughout the working year. Thus they offer a WORST-CASE scenario that you can design to and be sure you meet desired light levels at least 85% of the time.

The Design Sky you enter here is simply multiplied by the Daylight Factor at each calculation point to determine the actual daylight level.

WHAT IS THE DESIGN SKY FOR YOUR SITE ?

Design Sky Illuminance

If you know the design sky illuminance for your site, enter it in the text box immediately below. Otherwise, this value can be derived from the current latitude of your site (for more information, see the help file).

5000 lux

Sky Luminance Distribution Model

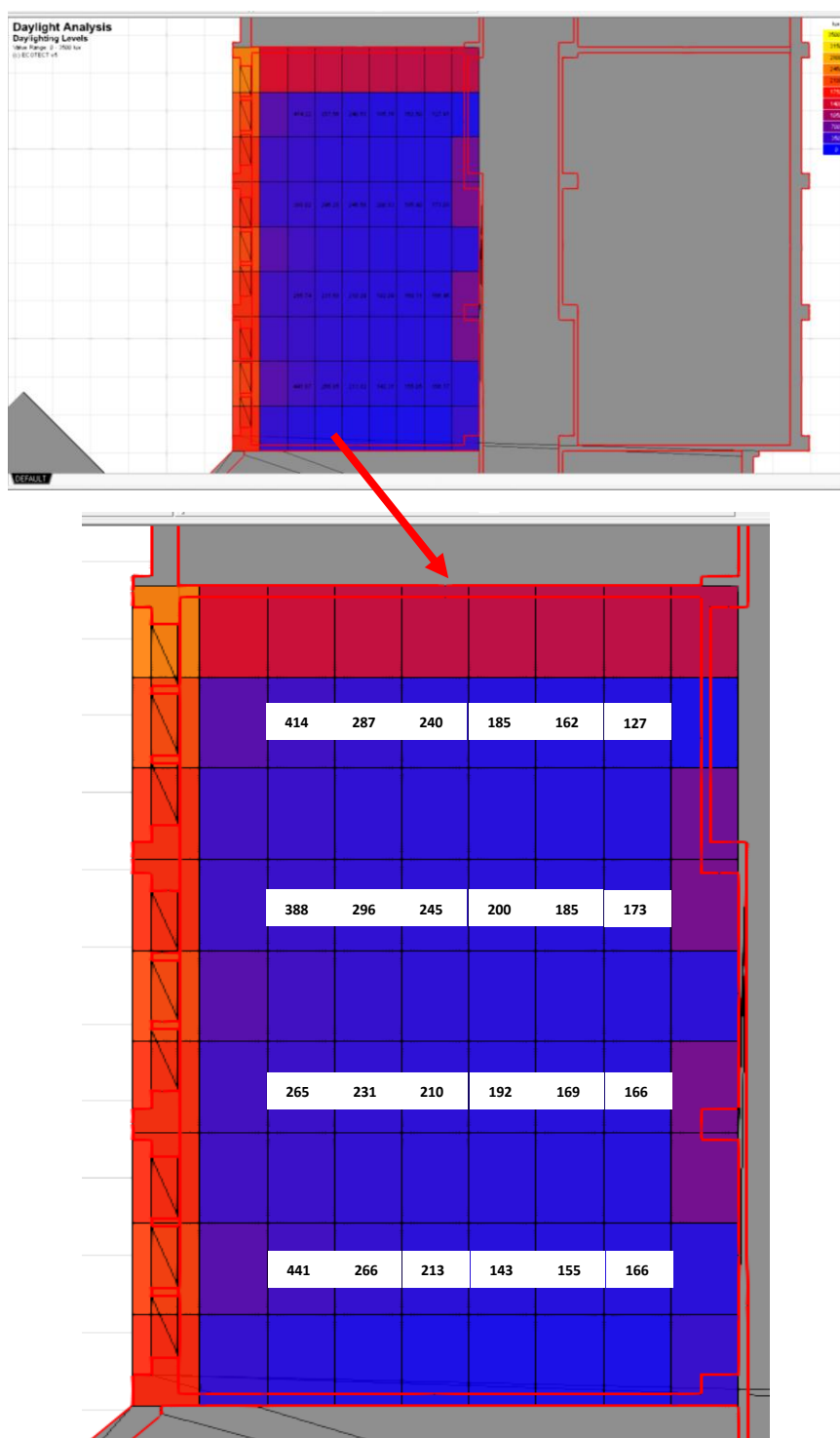
This setting determines how available natural light is distributed over the sky dome. Strictly speaking you should always use the CIE Overcast Sky option to obtain worst-case design values unless you are absolutely sure that the other is more appropriate.

☒ CIE Overcast Sky Condition (Recommended)

☐ CIE Uniform Sky Condition

Skip Wizard ☐ Always skip this wizard. << Back Next >> Cancel

Résultats



En hiver le niveau d'éclairage est inférieur à celui recommandé par les normes des différents pays (500 Lux pour les ateliers d'enseignement et 750 pour les salles de dessin industriel)

Conclusion

Eu égard aux résultats obtenus lors de nos investigations, analyse des données et calculs, nous estimons que les trois locaux étudiés, comparaison faite aux normes, sont excessivement éclairés près des fenêtres, par la lumière naturelle dans leur état original de conception. Toutefois, les dits locaux comportent des coins sombres aux endroits éloignés des fenêtres les quels sont désertés par les étudiants sauf pour travailler sur ordinateur.

Or, il est notoirement connu que l'excès d'éclairages provoque la fatigue, le manque de concentration etc.... et, par voie de conséquence, un faible rendement.

Aussi, pour éviter cet excès d'éclairement qui se manifeste, chez les usagers, par un inconfort visuel et des gênes de diverses natures, les dits usagers ont adopté des comportements circonstanciels pour s'en prémunir à savoir entre autre :

- Obstruction des vitrages transparents pour atténuer l'intensité de la lumière naturelle.
- Changement de place.
- Sortir hors de l'atelier.

Recommandations et conclusion :

En fonction du constat que nous avons établi lors de notre enquête, en plus des indications de notre précédente recherche ainsi que les études déjà citées dans notre partie théorique, nous avons formulé quelques recommandations susceptibles d'améliorer le confort visuel des étudiants aux seins des ateliers du département d'architecture de Tamda :

- Le plan de travail doit garder une distance minimale par rapport aux fenêtres. Cette distance doit être étudiée en fonction de la position du plan de travail par rapport à l'orientation du local et la trajectoire du soleil.
- Dans les salles de travail (tel que les ateliers de dessin) la clarté des tables de dessin s'avéré un élément favorable au confort visuel dans la mesure où la réduction du contraste entre le papier et le support de la table induit une diminution des efforts d'accommodation que l'œil doit effectuer à chacun de ses mouvements.
- L'utilisation de la végétation afin de réduire l'exposition des fenêtres au soleil, les plantations doivent être choisies soigneusement en prenant en compte leur taille et leur type (les plantes à feuilles caduques, plantes grimpantes etc...)
- Afin de minimiser l'éblouissement et de mieux diffuser la lumière des solutions simples et peu coûteuses peuvent être élaborées tel que la mise en place de stores vénitiens qui comportent des lames horizontales orientables, l'utilisation de film adhésif sur le vitrage des fenêtres et enfin les rideaux en tissu de couleur claire avec une certaine transparence.



Figure 68 store vénitien (source: <https://www.gamma.be>)



Figure 69 rideaux de couleur blanche et transparent (Source: <http://www.leroymerlin.fr/>)



Figure 70 fenêtre avec film adhésif posé sur la partie inférieure (source: <http://www.depoli-design.com/>)

- Une bonne maintenance des dispositifs utilisés est absolument nécessaire pour favoriser l'éclairage naturel. L'efficacité de ces systèmes est grandement affectée par leur degré de salissure. Il faut donc prévoir la possibilité de les nettoyer régulièrement.
- En hiver pour mieux éclairer l'intérieur des ateliers notamment les coins les plus sombre, un système de gestion d'éclairage artificiel peut être installé pour permettre de contrôler le flux lumineux en fonction de la présence des occupants ainsi que de la disponibilité de la lumière naturelle
 - Le zonage de l'installation électrique en fonction de la lumière naturelle.
 - La régulation de la lumière.
- L'association de LED bleues et blanc froid permettent d'obtenir une température de couleur très élevée, similaire à la température de couleur de la lumière du jour, qui peut atteindre jusqu'à 14 000 Kelvins.



Figure 71 L'éclairage d'une salle de classe peut avoir un impact sur les résultats scolaires utilisation de LED (Source: <http://www.monde-ampoule.fr/>)

- Disposer des lampes d'appoint près des plans de travail, afin de fournir une source de lumière supplémentaire quand la tâche à exécuter exige davantage d'éclairement lumineux.
- Entretenir les luminaires (enlever la poussière et améliorer le rendement lumineux) pour éviter les gênes occasionnées.
- Enfin, le type de mobilier ainsi que son agencement peuvent avoir de fortes répercussions sur la distribution de la lumière dans l'espace et sur le confort des occupants. Les éléments essentiels à la tâche visuelle habituelle (table, bureau, tableau, ...) doivent être disposés judicieusement en fonction de l'emplacement des ouvertures à la lumière naturelle.

Le confort visuel n'est pas une finalité abstraite qu'on pourrait atteindre avec des Recommandations rigoureuses comme les normes d'éclairement lumineux, mais plus la combinaison subtile de plusieurs conditions variables à satisfaire pour que l'occupant perçoive un confort visuel.

L'éclairage naturel est le plus approprié tant au niveau physiologique que psychologique mais sa variabilité nécessite un apport complémentaire d'éclairage artificiel, il doit être considéré comme le complément de la lumière naturelle et s'accorder autant que possible à son spectre lumineux et à ses variations grâce à un système de contrôle adéquat. Pour le confort des occupants, la source lumineuse principale doit être la lumière naturelle.

Des économies d'énergie appréciables peuvent être réalisées grâce à la diminution de l'éclairage artificiel, par la prise en compte de la disponibilité de l'éclairage naturel, en adaptant le temps durant lequel les lampes restent allumées et leurs flux lumineux aux besoins effectifs en éclairage d'un local. Signalons, en outre, que ce potentiel d'économies d'énergie lié à la gestion de la lumière naturelle est élevé quelle que soit l'orientation des ouvertures de l'édifice. Il est donc indispensable d'appliquer ce principe lors de la mise en place de stratégies destinées à limiter les consommations d'énergie et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère.

Cette recherche a eu pour trait l'étude du phénomène de l'éclairage naturel et l'évaluation du confort dans les salles d'enseignements, on s'est beaucoup plus intéresser les rayons du soleil ainsi qu'aux niveaux des éclairements et les gênes qui en découle , les résultats et observations obtenus nous ont permis d'aboutir à un certain nombre de conclusions et de recommandations, mais cela dit, cette recherche ne saurait à elle seule apporter toutes les

réponses inhérentes aux problèmes posés, il serait donc intéressant que ce travail soit complété par d'autres recherches en traitant le sujet d'un autre angle, par exemple :

- L'étude de l'éclairage artificiel dans les salles d'enseignements.
- mener une étude expérimentale plus approfondie aux niveaux des salles avec la collaboration des étudiants et des enseignants.
- L'utilisation de maquette et de ciel artificiel pour pouvoir expérimenter le maximum de cas.

Bibliographie

A.De HERDE et S. REITER, (2002). Eclairage naturel des bâtiments, Ed presses universitaires de Louvain, Louvain la neuve, Belgique.

ADEREE, Agence Nationale pour le Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique : Manuel technique de l'éclairage, Disponible sur : <http://www.clefverte.ma/>

AFE, (2010), Association Française de l'Eclairage, Disponible sur: <http://www.afe-eclairage.com.fr/>.

A. LIEBARD et A. De HERDE, (2005), Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, Ed Le moniteur, Paris.

A. TIBERGUENT, 2007 L'ambiance lumineuse et les risques professionnels, Disponible sur: <http://www.chups.jussieu.fr/>

A.VAN TROOS, (2009). Effets physiologiques de la lumière, Disponible sur: <http://www.psioplanet.com/>

B. DEROISY et A. DEROISY, (2011) Evaluation de l'éclairage naturel par simulations informatiques, Disponible sur : <http://www.cstc.be/>

B. MAGALI et D.ARNAUD, Guide d'aide à l'interprétation et l'amélioration des résultats des mesures sous les ciels et soleil artificiel du CSTC, Disponible sur : <http://www.energie.arch.ucl.ac.be/>

B.PAULE, (2007), Dispositifs d'éclairage naturel, Disponible sur: <http://moodle.epfl.ch/>

G. CHELKOFF, (2012) L'ambiance sensible à l'architecture : paradoxes et empathies contemporaines, Disponible sur : <https://halshs.archives-ouvertes.fr>

I. ARNAUD et M J-C LOUIS, (2013), Collection les classeurs de Techni.Cités guide de l'éclairage public : voirie et bâtiments, Numéro 46, Territorial éditions.

INRS, (2012) Institut de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, Disponible sur : <http://www.inrs.fr/>

J. BASTIE 2003, Mesure en éclairage, Disponible sur: <http://www.iufmrese.cict.fr/>

J. LEBAHAR (1983), Le dessin d'architecture ; simulation graphique et réduction d'incertitudes, édition parenthèses.

M.A.DIRAHOU (2015), Caractérisation de la qualité de l'environnement lumineux à l'intérieur des ateliers d'architecture à l'EPAU. Mémoire de magister, EPAU.

M.BODART, (2008). Le confort visuel et ses paramètres. Université Catholique de Louvain. Louvain La Neuve.

M.BODART, (2007) L'éclairage naturel des bâtiments, Disponible sur : <http://docum1.wallonie.be/>

M.BODART et A.DENEYER, Principes de base de l'éclairage naturel et du confort visuel, Disponible sur: <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/>

M.DERIBERE, P.CHAUVEL, (1968) L'éclairage naturel et artificiel dans le bâtiment, 61, boulevard Saint-Germain,

M.Jančuška et M.Klepáč. Science et éducation, Disponible sur: <http://www.omslighting.com/>

R.NARBONI (2006), Lumière et ambiances: Concevoir des éclairages pour l'architecture et la ville, Le Moniteur Editions.

ZUMTOBEL, Manuel pratique de l'éclairage, disponible sur : <http://www.zumtobel.com>

Les sites Internet :

- <http://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/>
- <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/eclairage/>
- <http://www.cusstr.ch/fr/en-bref/about-us>
- <https://www.lux-editions.fr/>
- http://www.labo-energetic.eu/fr/labo/a_telecharger/Guide%20d'utilisation/luxmetre.html
- <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/eclairage/accueil.htm>
- <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=2>
- <http://lecerveau.mcgill.ca/>
- <https://www.trilux.com/de/anwendungen/highlights/freiherr-vom-stein-gymnasium/>

- <http://www.crdp-montpellier.fr/themadoc/Architecture/reperes3-Imp.htm>
213471848315 larbi1962
- <http://www.freiherr-vom-stein-gymnasium-muenster.de/>
- <http://www.psioplanet.com/download/lumino/BlueLightWhitePaper-FR.pdf>
- <http://audience.cerma.archi.fr/cerma/pageweb/theorie/eclairage/eclairage2.html>
- <http://leclairage.fr/>
- <http://actu.epfl.ch/news/la-lumiere-stimule-notre-cerveau/>
- <http://www.heliophane.com/encyclopedie-eclairage/encyclopedie-eclairage-definition.html>
- <http://www.afe-eclairage.fr/docs/10293-ext.pdf>
- https://www.leclubled.fr/smartblog/35_l-impact-de-l-eclairage-sur-l-apprentissage-e
- <http://sustainability.williams.edu/green-building-basics/lighting>
- <http://www.aviationwallpaper.com/why-use-laser-cut-panels-in-your-home/>
- http://www.soliso.com/store-venitien-en-aluminium-venilight-35-ou-50mm,L_fr,P_produit,I_27.soliso?type=pro
- <http://www.atelierdustorepro.com/#2>
- <http://crumbprints.com/stores-a-lamelles>
- <http://inside-harmony.fr/bien-choisir-ses-rideaux/>
- <http://www.bkverre.ch/>
- <http://www.fakro.be/fr/produits/tous-les-produits/fenetres-de-toit/speciales/vitrages/>
- <http://www.depoli-design.com/fenetre-et-velux/151-sticker-vitres-bandes-horizontales.html>
- <https://www.gamma.be/fr/assortiment/store-venitien-gamma-1300-x-600mm-210-blanc/p/B168680>
- <http://www.solartech-nord.fr/c/film-adhesif-vitrage-habitation>
- <http://www.monde-ampoule.fr/blog/2015/06/05/eclairage-biodynamique-plus-heureux-et-plus-productif/>

Liste des figures :

Figure 15 Flux lumineux (source : A.DE HERBER 2002).....	06
Figure 16 Intensité lumineuse (source : A.DE HERBER 2002).....	06
Figure 17 Eclairement (source : A. DE HERBER 2002).....	06
Figure 18 Luminance (source : A.DE HERBER 2002).....	07
Figure 19 Spectre entier émis par le soleil (Source : http://www.lumiere-spectacle.org/)...08	08
Figure 20 Le spectre solaire (source : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique. (A.Liébard et A.De Herde, 2005).).....	08
Figure 21 Ciel uniforme (source : A.DE HERBER 2002).....	09
Figure 22 Ciel court CIE (source : A.DE HERBER 2002).....	10
Figure 23 Ciel clair (source : A.DE HERBER 2002).....	10
Figure 24 Ciel claire avec soleil (source : A.DE HERBER 2002).....	10
Figure 25 Les composants du facteur de lumière du jour SOURCE (INRS, 2012).....	11
Figure 26 Etiquette énergie (Manuel technique de l'éclairage, (ADEREE)).....	13
Figure 27 Température de couleur Manuel technique de l'éclairage, (ADEREE)).....	12
Figure 28 coupe sur l'œil humain (source: http://www.drhay-ophtalmo.fr/).....	14
Figure 15 Les cellules réceptrices de la rétine : les cônes et les bâtonnets (source : http://www-energie.arch.ucl.ac.be/).....	16
Figure 16 Perception d'un rectangle sous différents contrastes (Source : http://www-energie.arch.ucl.ac.be/).....	17
Figure 17 le Champ visuel (source : Traite d'architecture et d'urbanisme bioclimatique).....	19
Figure 18 Valeurs de l'éclairement requises pour un éclairage nominal dans les locaux de travail (source : La CUSSTR).....	21
Figure 19 L'évolution du spectre lumineux de la lumière naturelle modifie l'aspect d'un bâtiment (Opéra de Sydney arch. J. Utzon).....	24
Figure 20 Diagramme de confort en fonction de l'éclairage et des températures de couleurs (Source: http://www.ilocis.org).....	25
Figure 21 Différentes positions possibles d'un écran par rapport à une ouverture à la lumière naturelle. (Source B. MAGALI et D.ARNAUD).....	28
Figure 22 stratégie de l'éclairage naturel (Source : UCL - Architecture et Climat).....	31
Figure 23 Puit de lumière (Source B, PAULE 2007).....	31
Figure 24 Fenêtre avec light shelf (Source: http://sustainability.williams.edu/).....	39
Figure 25 Système de redirection de lumière (Source : http://www.aviationwallpaper.com/).....	40
Figure 26 Vitrage directionnel (Source: http://www.energieplus-lesite.be/).....	40
Figure 27 Protection solaire par des éléments architecturaux (Source : http://www.energieplus-lesite.be/)	43
Figure 28 Brise-soleil horizontale (source : http://www.archiexpo.fr/).....	43
Figure 29 Brise-soleil verticale (Source : http://www.archiproducts.com/).....	44
Figure 30 Store vénitien à lamelles (Source: http://www.energieplus-lesite.be/).....	44
Figure 31 Store en toile enroulable (Source: http://www.atelierdustorepro.com/).....	45
Figure 32 Store projetés à l'italienne (source: Magali Bodart UCL - Architecture et Climat).....	45
Figure 33 Stores plissés (Source: http://www.hbstores-geneve.ch/).....	46
Figure 34 Store à lamelles (Source : http://crumbprints.com/).....	46
Figure 35 Store vénitiens en aluminium (source : http://www.soliso.com/).....	47

Figure 36 Système de rideau (Source: http://inside-harmony.fr/).....	48
Figure 37 Vitrage absorbant (Source : http://www.fakro.be/).....	48
Figure 38 Vitrage réfléchissant (Source: http://www.bkverre.ch/).....	48
Figure 39 fenêtre avec film adhésif posé sur la partie inférieure (source: http://www.solartech-nord.fr/)	49
Figure 40 Salle de classe "cas d'étude" (Source: http://www.osram.fr/).....	52
Figure 41 Eclairage utilisé pour le cadre de l'étude (source : http://www.osram.fr/).....	53
Figure 42 le lycée Freiherr-vom-Stein-Gymnasium à Münster (source : http://www.freiherr-vom-stein-gymnasium-muenster.de/)	54
Figure 43 Salle de cours du lycée Freiherr-vom-Stein-Gymnasium (source : https://www.trilux.com/).....	54
Figure 44 vue d'intérieur du lycée Freiherr-vom-Stein-Gymnasium (source : https://www.trilux.com/).....	54
Figure 45 Eclairage de la tâche visuelle. (Source : http://www.thornlighting.fr/).....	56
Figure 46 Vue aérienne de l'extension de l'université MMTO à Tamda (Source : Google earth).....	61
Figure 47 Département d'architecture (Source : Bureau d'étude B.E.R.H.T.O).....	61
Figure 48 Représentation du bloc dans le diagramme solaire de Tamda le 10 juillet (latitude 36.4° et longitude 4.1°) source : Autodesk Ecotect Analysis 2011.....	62
Figure 49 vue sur l'extérieur département d'architecture (Source : Photo prise par l'auteur)....	62
Figure 50 Plans du département d'architecture (Source : Bureau d'étude B.E.R.H.T.O)	63
Figure 51 Vue d'intérieur de l'atelier A (Source : photo prise par l'auteur).....	64
Figure 52 Vue sur les façades de l'atelier A. (source : photo prise par l'auteur.).....	65
Figure 53 vue d'intérieur de l'atelier B (Source : photo prise par l'auteur).....	66
Figure 54 Vue sur la façade de l'atelier B (source : prise par l'auteur.).....	66
Figure 55 vue d'intérieur de la salle td C (Source : photo prise par l'auteur).....	67
Figure 56 Vue sur la façade de la salle td C (Source : photo prise par l'auteur.).....	67
Figure 57 Choix du lieu du travail atelier A et B (Source: l'auteur)	71
Figure 58 : Composants du luxmètre (Source: manuel d'utilisation du luxmètre).....	78
Figure 59 Division du local (Source : http://www.energieplus-lesite.be/).....	79
Figure 60 La prise de mesure à l'aide d'un luxmètre (Source : photo prise par l'auteur.).....	80
Figure 61 vue d'intérieur de l'atelier A "fenêtres fermées" (Source : photo prise par l'auteur.).....	82
Figure 62 vue d'intérieur de l'atelier A "fenêtres ouvertes" (Source: photo prise par l'auteur.).....	82
Figure 63 Vue d'intérieur de l'atelier B "sans rideau" (Source : Photo prise par l'auteur.).....	83
Figure 64 Vue d'intérieur de l'atelier B "rideau tiré" (Source : Photo prise par l'auteur.).....	84
Figure 65 Vue d'intérieur de la salle td C (Source : Photo prise par l'auteur.).....	85
Figure 66 Représentation du modèle 3D dans le diagramme solaire de Tamda le 15 juillet à 11h30 (latitude 36.4° et longitude 4.1°) (source : Autodesk Ecotect Analysis 2011).....	66
Figure 67 Représentation du modèle 3D dans le diagramme solaire de Tamda le 15 décembre à 11h30 (latitude 36.4° et longitude 4.1°) (source : Autodesk Ecotect Analysis 2011).	91
Figure 68 store vénitien (source: https://www.gamma.be/).....	94
Figure 69 rideaux de couleur blanche et transparent (Source: http://www.leroymerlin.fr/).....	94
Figure 70 fenêtre avec film adhésif posé sur la partie inférieure (source: http://www.depolidesign.com/).....	95

Liste des histogrammes :

Histogramme N° 9 Type d'activité (Source : L'auteur.).....	70
Histogramme N° 10 Appréciation de la lumière naturelle (Source : L'auteur.).....	71
Histogramme N° 11 L'intensité de la lumière naturelle (Source : L'auteur.).....	72
Histogramme N° 12 Gêne due aux rayons solaires directs (Source : L'auteur.).....	73
Histogramme N° 13 Gêne due aux reflets des rayons solaires sur le plan de travail (Source : L'auteur.).....	73
Histogramme N° 14 Solutions préconisées par les étudiants (Source : L'auteur.).....	74
Histogramme N° 15 Les différentes sources d'éblouissement (Source : L'auteur.).....	75
Histogramme N° 16 Utilité de l'éclairage artificiel (Source : L'auteur.).....	76

Liste des tableaux :

Table 2 l'impression visuelle ressentie en fonction de la valeur du FLJ mesurée (http://www.hge.guidenr.fr/).....	12
Tableau 2 Comparatif des caractéristiques de différentes lampes (Manuel technique de l'éclairage, (ADEREE)).....	14
Tableau 3 Indices d'ouverture et de profondeur en fonction du type de local.....	34
Tableau 4 Différentes précautions prises pour diminuer les risques d'éblouissement dus à l'éclairage naturel	42
Table 5 Comparaison entre les différentes normes relatives à l'éclairage (Source : M.A.DIRAHOU 2015).....	55
Tableau 6 Éclairement moyen (lux) (Source : http://www.thornlighting.fr/).....	57
Tableau 7 Eclairement moyen à maintenir, UGR, IRC : Valeurs recommandées par la norme EN 12494 pour l'éclairage des bureaux (source : les classeurs de Techni.Cités-mars 2011)...	57
Tableau 8 Niveaux d'éclairements et URG prescrits par la norme EN 12464 (source : les classeurs de Techni. Cités-mars 2011).....	58
Tableau 9 Tableau résumant les réponses des occupants des ateliers A et B (Source : L'auteur.).....	76
Tableau 10 tableau résumant les réponses des occupants des ateliers A et B (Source : L'auteur.).....	77
Tableau 11 L'indice « k » (Source : http://www.energieplus-lesite.be/).....	79
Tableau 12 Comparaison des résultats aux normes (Source : l'auteur).....	86

Annexe

TAMDA, le / /2016

Heure :

Salle d'atelier N° :

I-Généralités :

1. Sexe : ☐Homme. ☐Femme.

2. Age :

3. Statut : ☐ Etudiant (e). ☐ Enseignant (e).

4. Durant quel moment de la journée utilisez-vous votre atelier d'architecture?

.....

II-Inscrivez, une CROIX, à l'endroit où vous vous trouvez présentement ?

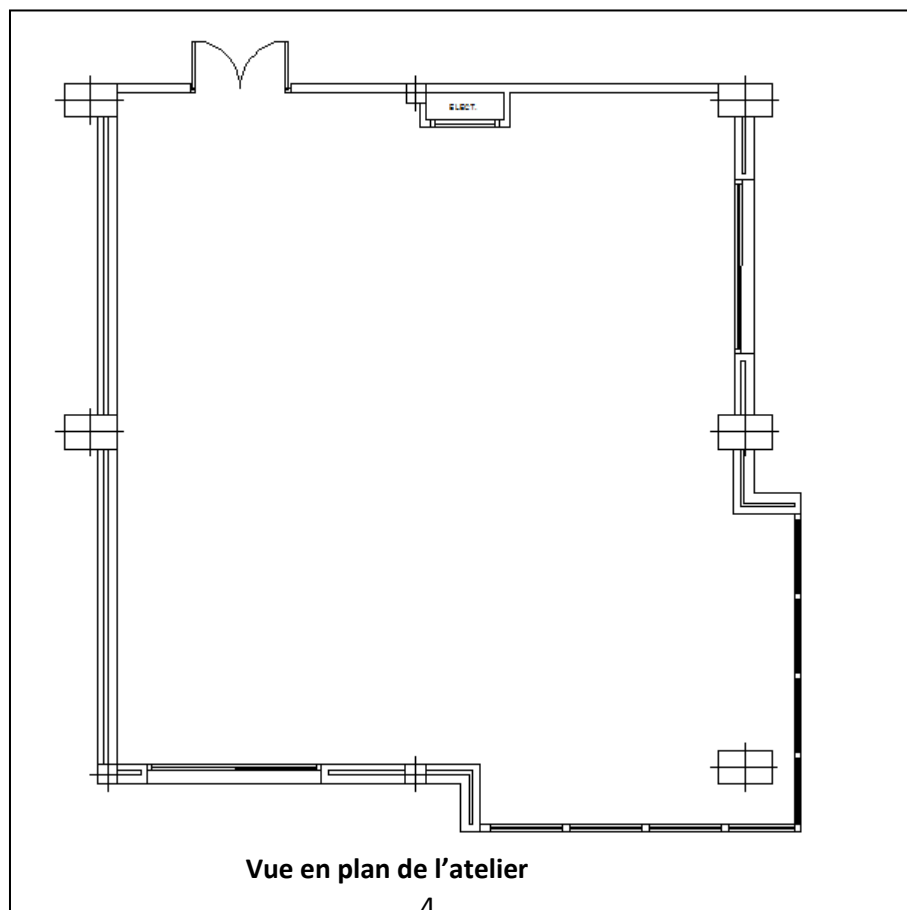
1. Quel type d'activité êtes-vous en train de faire ?

☐ Lecture-écriture. ☐ Dessin sur papier. ☐ Dessin sur ordinateur. ☐ Autre.

2. ENCERCLEZ, les lieux que vous estimez les meilleurs pour ce type d'activité et pourquoi.

.....

.....



III-Ambiance lumineuse :

1. Appréciez-vous la présence de la lumière naturelle dans l'atelier d'architecture ?

- ☐ Beaucoup. ☐ Modérément. ☐ Pas du tout.

2-trouvez-vous que la lumière naturelle disponible dans l'atelier d'architecture est:

- ☐ Insuffisante (salle sombre). ☐ Peu suffisante (salle peu éclairée). ☐ Suffisante (salle claire).
☐ Très suffisante (salle très claire). ☐ Excessive.

IV-Lumière solaire directe:

2. Etes-vous gêné dans votre travail par la présence des rayons solaires directs?

- ☐ Beaucoup. ☐ Modérément. ☐ Pas du tout.

3. Le reflet des rayons solaires sur votre plan de travail (papier, calque, ordinateur portable) gêne-t-elle votre vision ?

- ☐ Beaucoup. ☐ Modérément. ☐ Pas du tout.

4. Lorsque les rayons solaires sont intenses sur votre plan de travail (papier, calque, ordinateur portable), que faites-vous ?

- ☐ Se déplacé vers une autre table plus moins exposée dans la salle.
☐ Déplacer la table dans une zone moi exposée de la salle.
☐ Sortir hors de la salle.
☐ Essayer d'ignorer tout inconfort et se concentrer sur mon travail.
☐ Autres
(précisez).....

5. Aimerez-vous contrôler la pénétration des rayons solaires dans la salle à l'aide d'un système de filtrage des rayons solaire ?

- ☐ Oui. ☐ Non. Si OUI, quel est-il ?
.....

6. Souffrez-vous de l'éblouissement des rayons solaires ?

- ☐ Beaucoup. ☐ Modérément. ☐ Pas du tout.

7. Quelles sont les sources d'éblouissement qui vous gênent?

- ☐ Soleil. ☐ Fenêtres. ☐ Réflexions des parois internes.
☐ Réflexions du plan de travail (papier, calque, ordinateur portable). ☐ Appareils d'éclairage électrique.

V- L'éclairage artificiel :

1-L'éclairage artificiel de votre atelier d'architecture est-il :

- ☐Inutile. ☐Indispensable.

2-Si vous pouviez changer une chose dans l'éclairage artificiel, ça serait :

- ☐L'intensité, si oui : en plus ☐En moins. ☐Ça dépend.

- ☐La couleur, si oui : pourquoi ?.....

- ☐Le type, si oui : le quel ?

- ☐La disposition des lampes si oui : Comment ?.....

Selon vous, quelles sont les conditions nécessaires pour un éclairage électrique de qualité ?

.....

.....