

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : Architecture

Ref :.....



جامعة محمد خيضر

بسكرة

جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الهندسة المعمارية
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de

Magister en : Architecture

Option : Architecture, forme, ambiances et développement durable.

Optimisation de l'éclairage naturel dans les salles de classe par simulation inverse

Présenté par :

Mlle Selma BENDEKKICHE

Soutenu publiquement le : Le 8 Mai 2017

Devant le jury :

MEMBRE DE JURY	GRADE	STATUT	AFFILIATION
Dr. Moussadek BENABBES	M.C.A	Président	Université de Biskra
Pr. Nouredine ZEMMOURI	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Pr. Azeddine BELAKEHAL	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Pr. Kamal-Eddine MELKEMI	Professeur	Examineur	Université de Biskra

Année universitaire 2016/2017

DÉDICACE

À « Allah »

À la mémoire de mon défunt père

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,,,

À cet source de tendresse, de patience et de générosité, ,,

À ma mère !

À ma grande mère

À mes sœurs

À Mes frères

À mes nièces Et mes neveux

À mon adorable Mohamed Yahia,

À toute ma famille

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de mémoire Pr. ZEMMOURI Nouredine pour m'avoir encadrée. Je leur exprime mon extrême reconnaissance pour leurs précieux encadrements, pour leurs disponibilités et les échanges intéressants et surtout à sa confiance.

Je tiens à remercier également les membres du jury Pr. BELAKEHAL Azzeddine, Dr. BENABBES Moussadek, Dr. MELKEMI Kamal-Eddine pour avoir participé à ce travail. Un grand merci...

A tous mes enseignants qui m'ont initié aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect et d'un profond amour !!!

A Nasreddine HADAD, pour les efforts fournis lors de ma formation et pour le développement informatique de l'interface présentée dans ce mémoire.

A Motie DAICHE, pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement.

A tous mes collègues de post graduation, ainsi que toute l'équipe de notre laboratoire (LACOMOFA). Je remercie aussi tous ceux qui m'ont encouragé, et aidé de près, ou de loin,

A tous mes amis particulièrement ; Djamila BENAMOUMA, Wided GUEDOUDJ, Nabila ABABSA, Abir DOURARI, Ryma LAOUICHI, Soumia LAOUICHI, Amel OUFAl, Amina Naidja, Nadia FEKKOUS, Hala YAHIACHERFI, Boutheina DJEDDOU, Mohamed Amine BOUAKAZ.

A ceux qui m'ont soutenu, m'ont encouragé durant toute ma vie.

RÉSUMÉ

Optimisation de l'éclairage naturel dans les salles de classe par simulation inverse

La prise en compte de l'éclairage naturel durant la conception des bâtiments à vocation scolaire permet d'assurer le confort visuel à l'intérieur de ces édifices et conduit ainsi à l'amélioration du rendement des apprenants qui réagissent à tout moment avec la qualité de l'ambiance lumineuse qui leur est présentée.

Ce travail de mémoire a pour but de répondre aux deux questionnements majeurs qui sont d'un côté, les mutations qu'ont connu les salles de classe à l'ère du numérique qui témoignent du besoin de nouvelles exigences en matière d'éclairage naturel et d'ambiance lumineuse qui soient appropriées. Dans un autre côté, l'analyse des différentes méthodes et outils développés afin d'assister le processus de conception architecturale a montré que ceux-ci ne remplissent pas leur rôle dans la conception des ambiances puisqu'ils ne participent pas à la mise en forme du projet. Ils sont peu adaptés à l'activité de déclaration des intentions en termes d'ambiance lumineuse.

Pour cela, l'objectif de cette recherche est d'apporter une vraie aide et une vraie assistance aux concepteurs pour la formulation de leurs intentions vis-à-vis des ambiances lumineuses durant les premières phases de conception. La principale contribution de ce travail de recherche est la mise en place notre modèle « AD-Light version 1.0 » ; un modèle développé sous le paradigme de l'approche inverse, il part d'un élément de base « des images références » de salles de classe de « HQE » organisées dans un thésaurus thématique permettent de les imaginer, de les comprendre et parfois même de les ressentir. Le modèle comporte plusieurs modes de recherche et de navigation ouvrant l'accès à ces images références à travers des classes d'ambiance, des dispositifs ou bien des patrons d'ambiance. L'outil, par ailleurs, aide à dimensionner l'élément d'ouverture permettant la concrétisation d'une intention d'ambiance sur le plan quantitatif. Cette stratégie fournit un outil hybride ayant pour but d'associer des impressions lumineuses à la fois quantitatives liées au calcul afin d'aider le concepteur architecte à dimensionner les ouvertures de son projet, et qualitatives liées à la déclaration des intentions.

Mots clé : Lumière naturelle, Ambiance lumineuse, Salles de classe, l'approche inverse.

ABSTRACT

Optimization of natural lighting in classrooms by inverse simulation

The taking into account of the daylight during the design of the buildings with school vocation makes it possible to ensure visual comfort inside these buildings and thus leads to them and to the improvement of the output of the learner, which react at any time with the quality of bright ambience, which is introduced to them.

The purpose of this research task is to answer the two major questioning which are on a side, the changes which knew the classrooms at the era of the digital one who testify to the need for new requirements as regards daylight and luminous ambience, which are suitable. In another side, the analysis of various methods and tools developed to assist the process of architectural design showed that those do not fulfill their role in the design of ambience since they do not take part in working of the project. They are not well adapted to the activity of declaration of intention interns of luminous ambience.

For that, the objective of this research is to bring a true help and true assistance to the designer for the formulation of their intentions with the luminous ambience during the first phases of design. The principal contribution of this research task is the establishment of the model "AD-Light Version 1.0"; a model developed under the paradigm of the reverse approach, it starts from a basic element "of the images references" of classrooms of "HQE". Organized in a thesaurus set of themes make it possible to imagine them, to understand them and to sometimes even feel them. The model comprises several modes of research and navigation opening the access to these images references through classes of ambience, dispositive or pattern of ambience. The tool, in addition, help to dimension the element of opening allowing the concretization of an intention of ambience on the quantitative level

This strategy provides a hybrid tool having goal to associate at the same time quantitative luminous impressions related to calculation in order to help the designer architect to dimension the openings of his project, and qualitative related to the declaration of the intentions.

Keywords: Natural light, luminous ambience, Classrooms, the reverse Approach

المخلص:

ادراج الإضاءة الطبيعية اثناء تصميم المباني المدرسية يسمح لنا بضمان الرفاهية البصرية داخل هذه المباني، وبالتالي يؤدي إلى تحسين أداء المتعلم وتفاعله في أي وقت مع نوعية المحيط الضوئي المقدمة له.

يهدف هذا البحث إلى الإجابة عن تساولين رئيسيين، الأول من ناحية التغيرات التي عرفتها قاعات الأقسام في ظل العالم الرقمي والذي بدوره يشهد الحاجة الى متطلبات جديدة فيما يخص الإضاءة الطبيعية الداخلية والمحيط الضوئي. هذا من ناحية ومن ناحية أخرى أظهرت نتيجة دراسة الأساليب والأدوات التي تم تطويرها للمساعدة في عملية التصميم المعماري أنها لا تفي دورها في تشكيل المشروع ولا تساعد في صياغة نوايا المصممين المعماريين فيما يخص المحيط الضوئي.

لهذا فان الهدف من هذا البحث هو تقديم مساعدة حقيقية للمصممين لصياغة نواياهم بالنسبة للمحيط الضوئي في مراحل التصميم الأولى، المساهمة الرئيسية لهذا البحث هو نموذج «*AD-LIGHT VERSION1.0*» والذي يندمج ضمن نموذج المحاكاة العكسية، إذ ينطلق من عنصر أساسي " الصورة المرجعية " لقاعات الأقسام لمباني مدرسية ذات جودة بيئية عالية "*HQE*". نظمت وفق معجم موضوعي يسمح بتخيل، فهم وأحيانا حتى الشعور بالمحيط الضوئي.

يتوفر هذا النموذج على العديد من آلات البحث التي تسمح بتصفح " الصورة المرجعية " والبحث عن المحيط الضوئي او نموذج للمحيط الضوئي.

تساعد الأداة على حساب مساحة عنصر النافذة، طرح وتجسيد النوايا من أجل الحصول على كمية الإضاءة المطلوبة. توفر هذه الاستراتيجية أداة هجينة تهدف إلى الجمع بين كل من انطباعات الإضاءة الكمية المرتبطة بحساب مساحة الفتحات، ومرتبطة كذلك ببيان النوايا.

كلمات البحث: الضوء الطبيعي، المحيط الضوئي، قاعات الأقسام، محاكاة عكس

TABLE DE MATIÈRE

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	I
Sommaire.....	IV
Table d'illustrations.....	VII
List des tableaux.....	XIV

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction	1
La problématique.....	2
Les hypothèses	3
Les objectifs.....	5
La méthodologie.....	6

LA PREMIÈRE PARTIE**CHAPITRE I :****LA LUMIÈRE NATURELLE ET L'ARCHITECTURE**

Introduction	10
I.1. La lumière naturelle à travers les périodes de l'histoire de l'architecture	11
I.1.1. Epoque Une : Durant L'antiquité.....	11
I.1.2. Epoque Deux : Du moyen-âge jusqu'à la révolution industrielle	12
I.1.3. Epoque trois : 1 ^{ère} moderne et poste – moderne.....	13
I.1.4. Epoque Quatre : La lumière et les enjeux contemporains en architecture.....	15
I.2. La lumière naturelle et le projet architecturale.....	15
I.2.1. Rôles de la lumière naturelle dans le projet architecturale.....	15
I.2.1.1. Génération / révélation de la forme.....	15
I.2.1.2. Mise en valeur des matériaux.....	16
I.2.1.3. Définition de la structure.....	17
I.2.2. Manifestation / effets de la lumière naturelle dans l'espace architecturale.....	18
I.2.2.1. la lumière sert le lien entre l'intérieur et l'extérieur.....	19
I.2.2.3. la lumière divise l'espace.....	19
I.2.2.4. la lumière unifie l'espace.....	20
I.1.2.5. la lumière qui dirige.....	20
I.1.2.6. la lumière crée un lieu focal.....	21
I.3. la dialogue entre la lumière et l'architecte-concepteur	22
I.3.1. Walter Gropius.....	22
I.3.2. ludwig Mies & Van der Rohe.....	23
I.3.3. Frank Lloyd Wright.....	24
I.3.4. Alvar Aalto.....	25
I.3.5. Louis Kahn	26

I.3.6. Le Corbusier	28
I.3.7. Jean Nouvel	29
I.3.8. Richard Mier.....	30
I.3.9. Norman Foster.....	31
I.3.10. Tadao Ando	32
I.3.11. Alberto Campo Beaza.....	33
conclusion.....	36

CHAPITRE II :

L'AMBIANCE LUMINEUSE DANS LES SALLES DE CLASSE

Introduction.....	38
II.1. Etat de l'art de l'éclairage dans les salles de classe.....	39
II.1.1. premières réflexions autour de l'importance de l'éclairage dans le monde	39
II.1.2. les salles de classe à l'ère du numérique.....	43
II.2. la recherche d'une ambiance lumineuse pour les établissements scolaires.....	44
II.2.1. la notion de l'ambiance	45
II.2.2. Ambiance lumineuse.....	45
II.2.3. principe aux paramètres de l'ambiance lumineuse.....	46
II.2.4. Rôle de l'ambiance lumineuse.....	47
II.2.5. types d'ambiances lumineuses.....	47
II.2.6. langage de qualification d'une ambiance lumineuse.....	53
II.3. la qualité lumineuse et ses paramètres à caractériser	56
II.3.1. Le confort visuel.....	58
II.3.1.1. paramètres statiques.....	59
II.3.1.2. paramètres dynamiques.....	67
II.3.2. L'Agrément.....	68
Conclusion	70

CHAPITRE III :

LA PRÉDÉTERMINATION DE L'ÉCLAIRAGE NATUREL

INTRODUCTION	72
III.1. la conception architecturale	73
III.1.1. l'acte de concevoir	73
III.1.2. la conception en architecture	74

III.1.3. les outils de conceptions architecturale.....	76
III.2.l'assistance à la conception de l'éclairage naturel dans le projet architecturale	77
III.2.1. Les supports d'assistance exploitants les références	77
III.2.1.1. les documents de références.....	78
III.2.1.2. les outils d'exploration de références.....	78
III.2.2.3. Les manuels techniques.....	83
III.2.2.4. les abaquages de représentation et de calcul	84
III.2.2. les supports d'assistance exploitant les modèles physiques.....	86
III.2.3. les supports d'assistance exploitant les modèles numériques	88
III.2.3.1. la simulation de l'éclairage naturel	88
III.2.3.2. Algorithmes de calcul de l'éclairage naturel	89
III.3. l'évaluation de l'éclairage naturel par simulations informatiques.....	93
III.3.1. logiciel de simulation à base de modélisation géométrique.....	93
III.3.1.1. les outils avancés à environnement intégré	93
III.3.1.2. les outils simples	103
III.3.2. Logiciel de simulation à base des images	106
III.3.3. Synthèse de comparaison	115
CONCLUSION	117

CHAPITRE IV :

L'APPROCHE INVERSE

Introduction	120
IV.1. La philosophie de l'approche inverse	121
IV.1.1. La modélisation déclarative	122
IV.1.2. La structure du processus de modélisation déclarative.....	123
IV.1.3. Exemples des projets d'approches déclaratives.....	124
IV.1.4. Les avantages de la modélisation déclarative	127
IV.1.5. Les limites de la modélisation déclarative	128
IV.2. L'approche inverse en éclairage	131
IV.2.1. Simulation inverse de l'éclairage	131
IV.2.2. Etat de l'art de la simulation inverse de l'éclairage naturel	132
IV.2.3. classification des méthodes inverses.....	133
IV.2.4. représentation des intentions d'ambiances	135
IV.2.5.Exemples des outils de simulation inverse pour l'éclairage naturel.....	136
IV.2.5.1. L'outil Solimac.....	137
IV.2.5.2. light sketch	138
IV.2.5.3. l'outil expression	139

IV.2.5.4. Détail d'un prototype de logiciel de conception de lumière naturelle inverse l'éclairage naturel	140
IV.2.5.5. Daylight Gen	141
Conclusion	146

LA DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE V :

STRUCTURE ET MÉTHODOLOGIE DU MODÈLE

Introduction	149
V.1. la phase de déclaration de l'intention.....	150
V.1.1. Image photographique comme outil d'aide à la déclaration de l'intention d'ambiance	150
V.1.2. limites de l'image photographique comme support à l'étude des ambiances lumineuse	151
V.1.3. les caractéristique et le choix du corpus	152
V.1.4. Identification, caractérisation et indexation des ambiances lumineuse	151
V.2. la phase de génération des solution	174
conclusion	178

CHAPITRE VI :

ENVIRONNEMENT DU DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE (STRATÉGIE LOGICIELLE)

Introduction	179
VI.1. Présentation de l'outil AD-Light version 1.0.....	179
VI.2. Les objectifs de l'outil AD-Light version 1.0.....	182
VI.3. Environnement de développement AD-Light version 1.0.....	182
VI.3.1. Implémentation de l'outil AD-Light version 1.0.....	185
VI.3.2. Structure de la base de donnée	186
VI.4. modélisation de l'interface de l'outil AD-Light version 1.0.....	188
VI.4.1. La phase de déclaration de l'intentions	188
VI.4.2. la phase de génération des solutions	193
VI.5. scénario d'essai.....	196
Conclusion	
Conclusion générale.....	199
Bibliographie.....	203
Annexes	
Annexe 1. Les caractéristiques physiques, physiologique et photométrique de la lumière naturelle	212
Annexe 2. Les images traitées par la méthode de Demers	222
Annexe 3. Les tableaux d'indexation	238

TABLE ILLUSTRATIONS

CHAPITRE I

N°	Figure	source	N p
Figure I.1	le Pantheon de Rome	https://upload.wikimedia.org consulté le 24/12/2015	11
Figure I.2	Galerie Vivienne à Paris, (1823-1826)	BildarchivFoto Marburg	12
Figure I.3	L'Apple Store	www. img1.gtsstatic.com consulté le 24/12/2015	13
Figure I.4	Al Bahar Towers, Abu Dhabi- Émirats arabes unis, par Aedas, 2012	archdaily.com	14
Figure I.5	Heydar Aliyev Center de Zaha Hadid	www.ozartsetc.com) consulté le 26/12/2015	16
Figure I.6	JUBILEE CHURCH de Richard MIER	www.adeenidesigngroup.com) consulté le 26/12/2015	16
Figure I.7	Musée Guggenheim F. Gehry		17
Figure I.8	le dôme émouvant de l'église San Juan à Monterrey, au Mexique	http://geometrica.com	17
Figure I.9	Division de la masse par le décollement de ses parties à l'aide de fentes lumineuses	Biron, 2008	18
Figure I.10	La Fondation Lang Tadao Ando	http://www.cgarchitect.com	19
Figure I.11	Koshino House par Tadao Ando	http://trendland.com	19
Figure I.12	Pavillon d'exposition de Barcelone de Mies Van Der Rohe	archdaily.com	20
Figure I.13	House of the infinite Campo BAEZA	http://www.detailsdarchitecture.com	20
Figure I.14	Projet de Richard Serra	archdaily.com	21
Figure I.15	stunning church Finland	http://www.mesallemagnes.net.html	22
Figure I.16	le Bauhaus de Dessau Walter Gropius	http://www.mesallemagnes.net.html	23
Figure I.17	Institut de technologie de l'Illinois Ludwig Mies (1942)	www.miessociety.org	24
Figure I.18	le musée Guggenheim,	newyorkmania.fr	24
Figure I.19	la bibliothèque de Wolfsburg Aalto (1959-1962)	Chaabouni, 2013	26
Figure I.20	La bibliothèque de Wolfsburg	Thiry, 2014	26
Figure I.21	Représentation fausses-couleurs de la bibliothèque de Wolfsburg; relevé du 13-09-2011; 13h00-14h00; ensoleillement extérieur de 35000 à 37000 lux.	Thiry, 2014	26
Figure I.22	éclairage de la Galerie Une zone intérieure au Kimbell dans des conditions de ciel ensoleillé pour le solstice d'été lignes isolux de contour.	SEDA , BENSON ,2013	27
Figure I.23	Croquis dessiné par Louis I Kahn, The Kimbell Art Museum	Chaabouni, 2011	27
Figure I.24	Dessins de Le Corbusier, Eglise saint-Pierre (Les carnets de croquis de Le Corbusier)	Chaabouni, 2011	28

Figure I.25	La bibliothèque de L'IMA source	Belakehal, 2007	29
Figure I.26	Musée Burda Richard Meier	http://www.bachhuber-hoteleinrichtungen.de/gallery/frieder-burda-museum	30
Figure I.27	Normand Foster	www.fosterandpartners.com	31
Figure I.28	la maison Koshino Tadao Ando	portfolio.leone.free.fr	33
Figure I.29	Zamora Offices, Zamora, Spain, 2012 Alberto Campo Baeza	udis-tmc.blogspot.com	34
Figure I.30	Les croquis de l'architecte Alberto Campo Baeza	Chaabouni, 2013	34
Figure I.31	SIMMONS HALL, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY Cambridge, MA, United States, (1999 – 2002)	archdaily.com	35

CHAPITRE II

N°	Figure	source	N° page
Figure II.32	Evolution des standards d'éclairement pour les salles de classe (1930-1990). D'après Pattini (2005)	Iturra, 2011	41
Figure II.33	Représentation schématique de l'ambiance lumineuse	ARENE, 2014	46
Figure II.34	L'ambiance de la lumière du jour.	Narbori, 2006	47
Figure II.35	Indicateurs Typologiques d'Eclairage Naturel	Belakehal, 2007	54
Figure II.36	Indicateurs topologiques d'Eclairage Naturel.	Belakehal, 2007	55
Figure II.37	Indicateurs Morphologiques d'Eclairage Naturel.	Belakehal, 2007	55
Figure II.38	Modèle intégré de la qualité lumineuse	Cantin, 2008	57
Figure II.39	Facteur de lumière de jour	vizea.fr/wiki-lesenr/constructionwiki/outils-construction/flj.html	61

CHAPITRE III

N°	Figure	source	N P
Figure III.40	Représentation de dynamique du processus de conception architectural	Siret, 1997	76
Figure III.41	Interface de Day@mbiance	Chaabouni, 2011	80
Figure III.42	Interface d'iMage	Cervantès, 2012	81
Figure III.43	Définition et caractérisation des typologies d'espace et d'ouverture selon GuilhermLassance	Lassance, 1998	81
Figure III.44	Interface et fonctions de "Daylight Design Variation Book"	Diepens, 2000	82

Figure III.45	Méthode de création et de combinaison d'effets de lumière naturelle à partir d'images de référence	Demers, 2000	83
Figure III.46	Manuels de conception : Daylight design of buildings / Nick Baker et Koen Steemers (Baker, K. A. Steemers, 2002) / L'éclairage naturel des bâtiments/Sigrid Reiter et André De Herde (Reiter, De Herde, 2004) / Construire avec la lumière naturelle / Marc Fontoyont, Michel Perraudau, Pascale Avouac et Jean-Marc Lauby	Fontoyont et al., 2011	84
Figure III.47	Exemples d'abaques graphiques : tracé des ombres portées en dessin géométral (gauche) et à l'aide du diagramme solaire MT (droite)	Siret, 1997	85
Figure III.48	Interface de la feuille de calcul LUMcalcul®	Demers, Potvin, 2004	86
Figure III.49	Heliodon - Texas A&M's College of Architecture / Le ciel artificiel - Université Laval / Le SkyDome - The Welch School of Architecture	Gallas, 2013	87
Figure III.50	maquette impression 3D	arketyp3d.com	88
Figure III.51	Composante de Split flux formula	CSTC, 2011	90
Figure III.52	Principe de l'algorithme de radiosité.	CSTC, 2011	91
Figure III.53	Principe de la méthode du lancer	CSTC, 2011	92
Figure III.54	Affichage des résultats en pseudo-couleur ou en normal avec le maillage adaptatif de radiosité	Maamari, 2002	95
Figure III.55	Simulation lumineuse de la course solaire	logiciels.i3er.org/ecotect.html	96
Figure III.56	Distribution de l'éclairnement à l'intérieur d'un local	daysim.ning.com	97
Figure III.57	Indicateur du niveau d'éclairnement	F.Miguet 2007	98
Figure III.58	logiciel Phani Rendu en fausses couleurs de l'éclairnement	www.cstb.fr/dae/fileadmin/user_upload/documents/ECE_PHANIE.pdf	99
Figure III.59	Interface de VELUX	Haubruge & Bodart, 2012)	99
Figure III.60	Interface de Rhinocéros et du plugin DIVA	Gallas, 2013	101
Figure III.61	Processus de fonctionnement, interface et résultats de Diva-For-Rhino® (plugin de connexion entre Rhinoceros® / GrassHopper® et Radiance®)	Gallas, 2013	102
Figure III.62	Le plug-in Honeybee-for-Rhinosource	buildingenergysoftwaretools.com/software/honeybee	103
Figure III.63	Le logiciel Dalight 1-2-3 (� gauche l'interface, à droite résultat FLJ)	Gallas, 2009	104
Figure III.64	LESO DIAL	yorset.pagesperso-orange.fr/DD.htm	105
Figure III.65	EVALGLARE	Hirning, 2014	107
Figure III.66	Niveau du détail	Demers, 2007	108
Figure III.67	Le motif Dominant	Demers, 2007	109
Figure III.68	Niveau de graduation de la lumière	Demers, 2007	109

Figure III.69	Classification des images selon leur niveau de brillance et de contraste.	Demers 2004	111
Figure III.70	la méthode de DEMERS	source : auteur	112

CHAPITRE IV

N°	Figure	source	N p
Figure IV.71	La notion intermédiaire d'effet	Siret, 1997	120
Figure IV.72	Structure du processus de modélisation déclarative	Gallas, 2013	123
Figure IV.73	projet GINA (Géométrie Interactive Naturelle	Gérard Hégron	124
Figure IV.74	Processus de modélisation déclaratif proposé par Wordseye®	Auteur	125
Figure IV.75	Modélisation générative de villes et populations	Gaildrat	125
Figure IV.76	Architecture	Gaildrat)	126
Figure IV.77	Aménagement d'environnements virtuels	Gaildrat)	126
Figure IV.78	Differences entre modéleur impératif et modeleur déclaratif	CDMM97	129
Figure IV.79	le processus direct et inverse de simulation de l'ensoleillement	Houpert, 2004	130
Figure IV.80	Interface et fonctions de Solimac	Siret, 1997	136
Figure IV.81	Processus et résultats du modèle déclaratif LightSketch extrait de	Glaser et al., 2003	137
Figure IV.82	Principe de fonctionnement et résultats de la méthode inverse proposée par Vincent Tourre	Tourre, 2007	138
Figure IV.83	Prototype d'interface et de types de solutions que pourrait avoir et proposer le futur outil.	Gallas, 2009	139
Figure IV.84	Prototype d'interface et de types de solutions que pourrait avoir et proposer le futur outil (suite).	Gallas, 2009	140
Figure IV.85	la méthode de DaylightGen	Gallas, 2012	141
Figure IV.86	Les patrons d'ambiance dans le processus idée – déclaration d'intentions – génération de solutions source	Cervantès, 2012	143
Figure IV.87	Aperçu de l'interface de DARMIN	CAGLAR, 2014	144

CHAPITRE V

N°	Figure	source	N p
Figure V.88	lycée hôtelier Georges Frêche	projets-architecte-urbanisme.fr	152
Figure V.89	School of Fine Arts, Havana. Ricardo Porro	lindmanphotography.com	153
Figure V.90	Haywood Community College	hpbmagazine.org	153
Figure V.91	Salle de classe finlandaise	sydologie.com	153

Figure V.92	type de classification pour le patron salle de classe	Auteur	165
Figure V.93	Patron d'ambiance	Auteur	165
Figure V.94	Représentation de la page de calcul comme interface utilisateur	Daiche, 2015	177
Figure V.95	Représentation de la page de résultats	Daiche, 2015	177

CHAPITRE VI

N°	Figure	source	N p
Figure VI.96	la structure du modèle		181
Figure VI.97		gladir.com	183
Figure VI.98	la base de données de « AD-Light version 1.0 » Avec MySQL Workbench	Auteur	187
Figure VI.99	la page d'accueil« AD-Light version 1.0 »	Auteur	188
Figure VI.100	capture d'écran représentant l'option d'indexation« AD-Light version 1.0 »	Auteur	190
Figure VI.101	Processus et activités de l'indexation	Auteur	190
Figure VI.102	Capture d'écran représentant l'option de navigation« AD-Light version 1.0 »	Auteur	191
Figure VI.103	capture d'écran représentant la recherche par patron d'ambiance	Auteur	192
Figure VI.104	Processus et activités de recherche par patron« AD-Light version 1.0 »	Auteur	192
Figure VI.105	capture d'écran représentant l'insertion de données« AD-Light version 1.0 »	Auteur	193
Figure VI.106	capture d'écran représentant l'insertion de données« AD-Light version 1.0 »	Auteur	194
Figure VI.107	capture d'écran représentant l'insertion des données « AD-Light version 1.0 »	Auteur	194
Figure VI.108	capture d'écran représentant le choix de l'emplacement du point de calcul et le résultat du calcul de la surface	Auteur	195
Figure VI.109	Processus et activités de la phase de génération des solutions	Auteur	195
Figure VI.110	capture d'écran représentant la structure et les composants utilisée (plug-in Honeybee & Ladybug pour Rhinosource ®)	Auteur	196

CHAPITRE II

N°	Tableau	Source	N p
Tableau II.1	Recommandations et normes de confort visuel dans espaces d'enseignements	Iturra, 2011	41
Tableau II.2	Facteurs modificateurs des valeurs générales d'éclairage.	Serra et Coch (2005)	60
Tableau II.3	Relations entre facteurs de jour et impressions visuelle.	Iturra, 2011	62
Tableau II.4	Ratios de luminances recommandés pour les espaces d'enseignement.	normes indiquées Iturra, 2011	64
Tableau II.5	Récapitulatif présentant les gammes d'évaluation de prévision de l'éblouissement.	Alstan Jakubiec et Reinhart, 2011	66
Tableau II.6	Crédits du système de certification COCHPS associés à la vue sur l'extérieure	Iturra, 2011	67

CHAPITRE III

N°	Tableau	Source	N p
Tableau III.1	Typologies des outils d'aide à la conception (inspiré de Lawrence, 1993)	Gagnon, 2012	77
Tableau III.2	Image en niveaux de gris (grayscale) et histogramme correspondant.	Dubois, Travail pratique, 2004	110
Tableau III.3	Echelle du contraste : association des aspects physiques et perceptuels de la lumière	Demers, 2006	112
Tableau III.4	récapitulatif de la comparaison entre les logiciels	Auteur	113
Tableau III.5	Synthèse de la comparaison	Auteur	116

CHAPITRE IV

N°	Tableau	Source	N p
Tableau IV.1	Comparaison entre modeleur impératif et déclaratif (GEODE)	Tahiry, 2012	130
Tableau IV.2	Récapitulatif	Auteur	145

CHAPITRE V

N°	Tableau	Source	N p
Tableau V.1	les projets choisis pour le corpus	Auteur	155
Tableau V.2	La facette « surfaces intérieures »	Auteur	160
Tableau V.3	La facette « Classe d'ambiance »	Auteur	162
Tableau V.4	les images traitées selon la méthode de Demers	Auteur	167
Tableau V.5	Indexation des images	Auteur	173
Tableau V.6	Tableau des valeurs obtenues à partir des simulations d'éclairage	Cervantès, 2012	175

CHAPITRE VI

N°	Tableau	Source	N p
Tableau VI.1	Module et environnement logiciel d'implémentation de la phase de déclaration de l'outil	Auteur	185
Tableau VI.2	valeurs des surfaces calculées	Auteur	196
Tableau VI.3	les résultats de simulation	Auteur	198

CHAPITRE VI

N°	Tableau	Source	N p
Tableau VI.1	Module et environnement logiciel d'implémentation de la phase de déclaration de l'outil	Auteur	185
Tableau VI.2	valeurs des surfaces calculées	Auteur	196
Tableau VI.3	les résultats de simulation	Auteur	197

INTRODUCTION GENERALE

"« Light belongs to the heart and spirit. Light attracts people, it shows the way, and when we see it in the distance, we follow it. »

Ricardo Legorreta "

INTRODUCTION

Minimiser l'empreinte écologique et assurer la qualité environnementale de la production architecturale sont devenues aujourd'hui des soucis majeurs des concepteurs et constituent la problématique contemporaine à laquelle doit répondre tout architecte. Pour cela, la maîtrise de l'éclairage naturel semble de plus en plus évidente pour contribuer à des systèmes d'éclairage dit optimaux en termes de confort et de dépenses énergétiques. Dans ce domaine, de nouveaux concepts sont apparus au fil des dernières décennies comme la démarche américaine LEED¹, la démarche française HQE² avec ses 14 cibles...etc. Ceux-ci peuvent être considérés comme réponse aux nouveaux enjeux comme la lutte à la fois contre le gaspillage des ressources d'énergie rares et contre la brutale accélération des changements climatiques touchant notre planète.

Eclairer naturellement un espace est donc plus qu'une solution technique à un problème d'efficacité énergétique ou bien même qu'une solution esthétique d'intégration à l'architecture. La lumière naturelle doit être un composant essentiel d'une philosophie qui reflète une attitude plus responsable et plus sensible de l'être humain par rapport au milieu où il vit (Cornier, 2006). Elle tient un rôle important notamment dans l'architecture scolaire ces dernières années où les recherches ont montrés l'importance de la lumière naturelle dans les salles de classe et ses effets pour la santé des occupants et la performance scolaires. A ce sujet, le groupe Heschong Mahone (1999) identifie une corrélation entre l'éclairage naturel et la réussite scolaire. Küller et Lindsten (1992) ont confirmé l'importance de la disponibilité d'éclairage naturel pour la production de l'hormone Cortisol chez les élèves (Iturra, 2011). Woolner et ses collègues (2007) remarquent quant à eux l'impact positif d'autres aspects tels que « la couleur » et « la beauté » des espaces intimement déterminés par la lumière (Iturra, 2011).

¹ Leadership in Energy and Environmental Design

² Démarche de Haut Qualité Environnementale est un concept environnemental français datant du début des années 1990.

L'apparition de nouveaux supports d'enseignement a apporté une nouvelle approche de l'enseignement, et par conséquent de nouvelles exigences visuelles et d'éclairage naturel. La salle rectangulaire n'est plus adaptée. Il faut des espaces qu'on peut modeler au gré des besoins (Forster, 2004). Comme Marchand (2004) le dit : « *la salle de classe tend à s'écarter du modèle rectangulaire traditionnel. Elle n'a souvent plus de porte et se déforme. Sans doute va-t-elle se dissoudre dans d'autres espaces car l'école de demain n'aura vraisemblablement plus besoin de classes* », cette déclaration confirme que l'évolution de l'espace didactique, à travers le temps, a besoin d'une réflexion synchronique, d'une part de l'évolution des sciences et technologies et d'autre part de la production d'une architecture instrumentalisée par l'esprit du temps et dans notre façon d'exploiter l'éclairage naturel.

À la vue de ces critères d'architecture, de santé et d'énergie gratuite, la lumière naturelle devient un véritable enjeu dans une démarche environnementale. La salle de classe doit donc présenter un espace adéquat et favorable au travail et à la santé des utilisateurs (élèves, enseignants). Elle se doit de plus en plus écologiques et d'intégrer au maximum des solutions en faveur du développement durable. Ceci a été reconnu par l'Organisation des Nations Unies (2002) qui a désigné la période 2005-2014 comme la décennie des Nations Unies pour l'éducation en vue du développement durable et qui a établi la rénovation et la construction d'écoles durables comme l'une de ses stratégies clés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et stimuler des styles de vie responsables à long terme (UNEP, 2007).

LA PROBLEMATIQUE

La prise en compte de l'éclairage dans la conception architecturale joue un rôle important dans l'amélioration de la qualité des ambiances dans les salles de classe. La lumière naturelle est au cœur des besoins architecturaux. Elle a une grande influence sur le confort visuel et la qualité architecturale des espaces intérieurs (Chaabouni, 2011). Elle participe à l'esthétique de l'architecture ; L'éclairage, support physique de l'ambiance lumineuse, est un équilibre entre l'espace et la lumière, elle la dévoile, révèle l'espace, crée l'ambiance... (Tourre, 2007).

Les différentes fluctuations de la lumière sont stimulantes pour le cerveau et permettent de réduire la sensation de fatigue et de relaxer les usagers du bâtiment mais elles constituent un réel défi pour l'architecte (Cervantès, 2012), elles réduisent la capacité de prévoir et de contrôler les ambiances de lumière naturelle générées à l'intérieur des espaces conçus. (Siret, 1997 ; Tourre, 2007). La recherche d'un système optimale pour l'éclairage naturel est une

tâche très complexe. Elle fait appel à un ensemble de caractéristiques détaillées et diverses en rapport avec les ouvertures, leurs positions ainsi que les propriétés des surfaces composant l'espace (Tourre, 2007)...etc. En effet l'action d'optimisation dans la conception architecturale nécessite la synthèse et l'équilibre d'un grand nombre de paramètres pour atteindre l'harmonie de l'espace, l'alchimie architecturale (Tourre, 2007).

Le choix des qualités lumineuses reste essentiellement une tâche assez délicate qui nécessite, dans toutes les phases du projet, un investissement considérable, des connaissances vastes et des idées nouvelles qui permettent à l'architecte de mieux réaliser son projet. De plus, la lumière naturelle peut se dévoiler comme un moyen architectural particulièrement riche dans la génération des ambiances (Chaabouni, 2011). Il revient donc aux architectes d'imaginer et de projeter des ambiances lumineuses qui apporteront une qualité sensible aux salles de classe tout en satisfaisant les exigences liées aux différents usages de ces espaces. L'architecte doit notamment établir des stratégies qui répondent aux besoins quantitatifs et qualitatifs des occupants et réduisent la consommation énergétique.

Plusieurs méthodes et outils ont été développés pour assister les architectes dans la conception des ambiances lumineuses. De plus, et suite au développement de l'informatique et le recours à la conception assistée par ordinateur "CAO", les outils de simulation numérique de l'éclairage ont effectué des progrès considérables au cours des dernières années, ce qui leur permet aujourd'hui de jouer un rôle de plus en plus important dans la conception de l'éclairage dans les bâtiments. Ces méthodes de simulations directes sont nécessaires mais non suffisantes dans le contexte de la conception architecturale, elles nécessitent des informations précises qui caractérisent les modèles étudiés et demandent une définition géométrique complète des éléments du projet et de leur environnement, elles n'agissent en conséquence qu'un outil correctif basée sur la notion d'essai-erreur (Tourre, 2007). L'analyse de ces méthodes montre qu'ils sont peu explorés et peu adaptés à l'activité de formulation des intentions des concepteurs durant les premières phases de conception (Chaabouni, 2011). Pourtant, les intentions sont à considérer comme le fil conducteur à partir duquel découlera l'ensemble de la démarche projectuelle.

Les concepteurs cherchent très tôt à formaliser des intentions d'ambiances lumineuses en s'appuyant largement sur leur expérience et sur celle des autres concepteurs (Chaabouni, 2011). La lumière doit être pensée selon les effets qu'elle produira, les usages de l'espace

qu'elle éclairera, les éléments qu'elle viendra mettre en valeur ou au contraire dissimuler (Cervantès, 2012).

Le problème posé ici à l'architecte est de trouver la configuration matérielle supportant l'ambiance qu'il souhaite exprimer ; Cette ambiance est exprimée à travers une intention d'ambiance qui traduit la volonté du concepteur. Cette intention d'ambiance est utilisée comme ligne directrice pendant la conception (Siret, 2007).

Et afin de répondre aux besoins éventuels d'un concepteur cherchant des informations sur des ambiances lumineuses, à cet effet, plusieurs questions se posent :

Comment passer d'une idée d'ambiance lumineuse à une solution architecturale ?

Comment proposer aux concepteurs une aide efficace et adaptée à l'activité de formulation des intentions ?

Comment peut-on représenter les intentions d'ambiance lumineuse ? Autrement dit, comment l'architecte peut-il choisir de manière intuitive l'effet qu'il imagine ou ambiance souhaité ?

LES HYPOTHESES

Afin de pouvoir répondre aux questionnements précédemment cités, la présente étude propose les hypothèses suivantes :

1. L'insertion de la simulation inverse dans le processus de conception permet de compléter les méthodes de simulation directe et répondre au problème de la création d'un outil d'aide à la conception par l'intention d'ambiance lumineuse ;
2. Le recours aux références photographiques des salles de classe de HQE dans la conception des ambiances lumineuse peut guider l'architecte dans la formulation de ses intentions ; une base d'images pertinente pour avancer et alimenter les activités de conception des ambiances lumineuses du concepteur.

LES OBJECTIFS

Ce travail de recherche s'intéresse à la question de la lumière naturelle comme facteur participant au processus de conception architecturale dès les premières phases et à l'intégration de l'éclairage naturel aux bâtiments scolaires dans une perspective de développement durable de l'architecture.

Notre objectif est d'optimiser éclairage naturel par une simulation inverse et de fournir un outil qui aidera à établir une liste de recommandations ou de propositions concrètes pour les futures infrastructures pédagogiques. En répondant aux objectifs suivants :

- Optimiser éclairage naturel par utilisation de la simulation inverse pour avoir une configuration architecturale optimale de manière à conjuguer une meilleure qualité de confort visuel qui s'adapte le mieux à la sensibilité de l'œil humain avec des économies d'énergie substantielles en termes d'électricité pendant le jour.
- Développer un outil qui propose d'organiser les images références ; Ces images représentent des configurations architecturales des salles de classe des établissements scolaires de HQE portant une attention particulière à la lumière.
- un outil didactique fondés sur l'utilisation de références pour aider le concepteur à formuler ses attentes en matière d'ambiances lumineuses et lui proposer des solutions possibles.
- Comprendre le lien qui peut exister entre les différents facteurs qui constituent l'ambiance lumineuse dans une salle de classe et comment afin d'améliorer la qualité spatiale de futures salles de classe par la prise en compte des intentions du concepteur en matière de confort et d'ambiance lumineuse dès la phase de l'esquisse.

LA METHODOLOGIE

Pour aborder cette problématique nous avons divisé notre mémoire en deux parties : La première partie est consacrée à la formulation des définitions théoriques des fondements de notre travail. Elle s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre : [lumière naturelle et l'architecture] qui comporte une brève historiographie de la lumière naturelle de l'antiquité à nos jours, ainsi la relation mutuelle entre la lumière naturelle et le projet architectural et les différentes expériences proposées par les architectes de la lumière au fil de l'histoire afin de connaître les manières abordées par ces architectes pour déclarer leurs intentions en termes de lumière.

Le deuxième chapitre : [L'ambiance lumineuse dans les salles de classe] expose l'état de l'art de l'éclairage naturel dans les salles de classe, les mutations de l'espace scolaire à l'ère

du numérique afin d'apprécier l'avancée des recherches sur la question de prise en compte de l'ambiance lumineuse dans les salles de classe.

Le troisième chapitre : [La prédétermination de l'éclairage naturel] est consacré à la méthodologie de prédétermination de l'éclairage naturel, ainsi un état de l'art sur les différentes méthodes les outils de conception de l'éclairage naturel et l'ambiance lumineuse afin de comprendre les avantages et les limites de chaque méthode.

Le quatrième chapitre : [L'Approche inverse] traite la philosophie de l'approche inverse qui nous permettra de justifier notre choix pour cette approche en montrant quelques limites de l'application de la simulation directe dans la conception architecturale en terme d'éclairage naturel et des opportunités que peut offrir une adoption de la simulation inverse dans l'amélioration de la qualité d'éclairage dans le projet architectural.

La deuxième partie présente la structure de l'outil que nous développons ainsi que son mode d'implémentation dans un outil logiciel. Cette partie est constituée de deux chapitres :

Le cinquième chapitre : [Structure et méthodologie du modèle] abordera la structure logique de l'outil qu'on va développer et la méthodologie du modèle. En suivant le schéma du processus de conception de l'approche inverse, on va définir les différentes étapes que notre modèle doit comporter. Nous avons commencé par la phase de déclaration de l'intention. Cette dernière se base sur des images photographiques des salles de classe des établissements scolaires de HQE. De ce fait elle s'agit de recueillir les données nécessaires, Identifier, caractériser les ambiances lumineuses contenant dans ces images en utilisant la méthode de Demers ensuite, la deuxième phase se caractérise par l'intégration du modèle développé par Daiche (2015) afin de générer des réponses architecturales sur le plan quantitatif par simulation inverse sous forme de calcul des surfaces des ouvertures correspondre le niveau d'éclairement souhaité dans une deuxième étape.

Le sixième chapitre : [Environnement d'implémentation du modèle : Stratégie logicielle]

Ce chapitre présente une maquette informatique que nous avons nommé « AD-Light version 1.0 », il décrit la structure logique du modèle, son schéma de fonctionnement ainsi que l'environnement d'implémentation en s'inspirant du system *Day@mbiance* développé par Chaabouni (2011) et le module logiciel, *IMAGE*, développé par Pascal Humbert. Nous concluons alors, sur la pertinence du prototype vis –à- vis de la problématique, ses limites et de perspectives d' évolutions possibles.

PLAN DU MEMOIRE

Introduction générale



Chapitre 01 : *la lumière naturelle et l'architecture*

Chapitre 02 : *L'ambiance lumineuse dans les salles de classe*

Chapitre 03 : *La prédétermination de l'éclairage naturel*

Chapitre 04 : *L'Approche inverse*



Chapitre 05 : *Structure et méthodologie du modèle*

Chapitre 06: *Environnement d'implémentation du modèle (Stratégie logicielle)*



Conclusion générale et perspectives

LA PREMIÈRE PARTIE :

*CHAPITRE I : LA LUMIÈRE NATURELLE ET
L'ARCHITECTURE.*

"La contemplation de la lumière est en soi une chose plus excellente et plus belle que toutes les utilisations que l'on peut en faire. "

Francis Bacon (1561-1626)

I. INTRODUCTION

La lumière naturelle a toujours tenu une place primordiale dans les choix architecturaux à travers l'histoire. L'utilisation de la lumière naturelle en architecture a été, au cours de l'histoire, une réponse soit à un besoin fonctionnel, de symbolisation, de création artistique, d'économie d'énergie, de préservation de l'environnement (Belakehal, 2007). C'est un élément librement disponible, elle est prise en compte prioritairement dans les programmes d'architecture contemporaine. L'approche environnementale qui se développe aujourd'hui ne fait qu'accentuer le rôle important et conséquent de la lumière naturelle en architecture (Chaabouni et Al, 2007).

La lumière du jour n'est pas seulement considérée en tant qu'énergie renouvelable : elle est aussi appréhendée comme un élément structurant du projet. La lumière est une matière. Elle est mesurable, quantifiable et qualifiable. Sa manipulation vient donner à l'architecture un autre statut qui sans elle ne serait qu'une simple construction froide et sans âme (Zemmouri, M., 2013). La question de la lumière dans l'architecture est essentielle, dans la mesure où les volumes et les matériaux ne sont révélés que par la lumière qui les baigne (Paule, 2014). Elle a toujours fasciné les architectes qui la considèrent comme un matériau mouvant, générateur et révélateur de leurs œuvres (Gallas, 2013). Son rôle est déterminant dans la conception de l'espace, sa perception, sa symbolique.

Dans ce chapitre on essaye en premier lieu de parcourir une brève historiographie de la lumière naturelle de l'antiquité à nos jours afin de comprendre l'influence mutuelle entre l'architecture et la lumière naturelle. En second lieu, On apporte la lumière naturelle et le projet architectural pour objectif de comprendre son rôle et ses effets dans espace architectural. En dernier lieu nous aborderons les différentes expériences proposées par les architectes de la lumière au fil de l'histoire afin de connaître les manières abordées pour déclarer leurs intentions en termes de lumière naturelle.

I.1. La lumière naturelle à travers les périodes de l'histoire de l'architecture

Un regroupement selon l'évolution de la prise en compte de la lumière naturelle à travers les périodes de l'histoire de l'architecture.

I.1.1. Epoque Une : Durant l'antiquité :

Les différents vestiges légués par les civilisations les plus lointaines montrent que la lumière du jour a été intégrée durant la conception des édifices. Les bâtisseurs de ces civilisations ont utilisé la lumière naturelle comme outil d'expression de la spiritualité, cela par la création d'évènements visuels pour donner une valeur divine à leur œuvres (ARENE et ICEB, 2014).

- Le grand temple d'Abou Simbel dédié aux divinités de l'Égypte antique constitue un des exemples d'adoption de la dimension périodique de la lumière du soleil à la fois dans l'orientation de l'édifice (façade orientée vers le soleil levant assurant la reproduction d'évènement deux fois par an) et l'organisation des espaces intérieurs par rapport à la lumière (la lumière sert de lien entre le temps de l'existence humaine et celui des cycles des corps célestes) (Gallas, 2013).

- Pour la civilisation romaine, l'exemple est Le Panthéon de Rome construit au 1^{er} siècle av J.C et dont le zénith est ouvert d'un cercle constituant la source de lumière naturelle à l'intérieur de l'édifice. Cette Oculus projette, selon le type de ciel, un ovale de lumière changeable en matière de netteté et de découpage, ce qui rend chaque instant à l'intérieur de l'édifice visuellement unique (ARENE et ICEB, 2014).

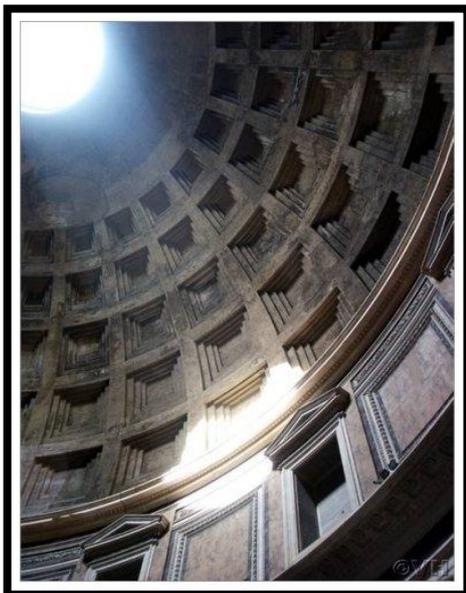


Figure I.1 : le Pantheon de Rome (source : <https://upload.wikimedia.org>) consulté le 24/12/2015.

I.1.2. Epoque Deux : Du moyen-âge jusqu'à la révolution industrielle :

Cette époque est caractérisée par la mise en place de nouvelles techniques de construction comme la voûte en ogive, la croisée d'ogive ou de l'arc butant durant le moyen âge. Ce qui a permis aux architectes du moyen âge d'établir un nouveau rapport à la lumière naturelle : l'espace des cathédrales est inondé de lumière, une nouvelle métaphysique pour représenter la clarté, l'illumination, d'intelligibilité et de transparence. (ARENE et ICEB, 2014).

Durant la période industrielle, la lumière prend plusieurs dimensions, mais la plus prédominante fut celle fonctionnelle. Cette période a fourni plusieurs matériaux, surtout le verre et le métal qui sont devenus relativement disponibles pour être utilisés dans les constructions (Foura, M., 2005). Vu l'importance du secteur de l'industrie et dans le but d'amélioration de la productivité, de nouvelles exigences visuelles étaient créées pour les activités des ouvriers, entre autres l'amélioration de la quantité de lumière à l'intérieur des pièces, notamment les ateliers. De ce fait, les toitures furent percées de sheds ou lanterneaux (Gallas, 2013).



Figure I.2: Galerie Vivienne à Paris, (1823-1826)
par BildarchivFoto Marburg

I.1.3. Epoque Trois : l'ère moderne et post-moderne

Cette époque est caractérisée par l'émergence de nouveaux concepts et principes de l'architecture appartenant à un mouvement, à un courant architectural ou à un architecte bien précis. La lumière naturelle a été un outil de concrétisation de ces concepts et principes

comme celui de la transparence pour le modernisme en architecture qui la considère comme un symbole de modernité et d'émancipation des contraintes matérielles et physiques qui ont marqué les mouvements précédents de l'histoire de l'architecture (Foura, M., 2005). L'architecture postmoderniste a développé d'autres principes comme celui de la légèreté des techniques constructives et particulièrement celle de la fabrication et du montage des panneaux de verres défiant ainsi les lois de la physique pour atteindre le niveau de transparence totale. Cette transparence a donné une valeur symbolique à des édifices tels que le Cube de l'Apple Store de New York conçu par Peter Bohin. Ce bâtiment constitue un symbole d'innovation technologique que la société Apple a utilisé pour affirmer son potentiel d'innovation (Gallas, 2013).

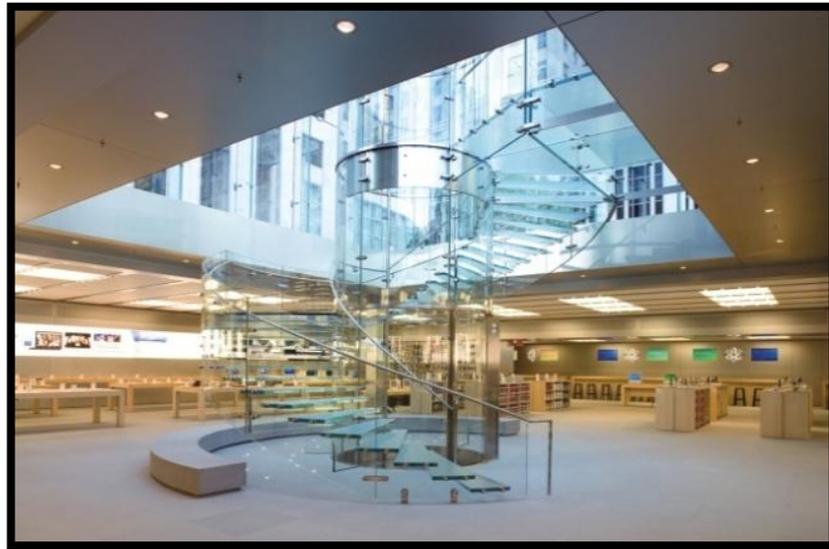


Figure I. 3 : L'Apple Store (source : [www. img1.gtsstatic.com](http://www.img1.gtsstatic.com)) consulté le 24/12/2015

I.2.4. Epoque Quatre : la lumière et les enjeux contemporains en architecture

Après la crise pétrolière de 1972, des nouveaux enjeux sont apparus, le développement des mouvements environnementalistes, des préoccupations écologiques et scientifiques orientent les architectes vers de nouveaux modes de conception partout dans le monde ; architecture écologique, architecture bioclimatique, architecture solaire, haute qualité environnementale, architecture durable. Toutes ces appellations répondent à la même préoccupation : concevoir une architecture plus respectueuse de l'environnement et moins dépendante des sources d'énergie artificielle (Cornier, 2006).

La notion actuelle de L'architecture sensible³ adaptative⁴ peut représenter une approche plus écologique dans l'architecture, conduisant à un nouveau modernisme dans un monde cybernétique où la nature et la science peuvent être synthétisées. Comme l'étude de Drozdowski et Gupta (2009) qui indiquent que des fenêtres intelligentes peuvent réduire des consommations énergétiques de 20-30% dans de nombreux bâtiments commerciaux et fournir le confort, plusieurs autres études ont été démontrées que l'architecture adaptative contribuerait à la réduction de l'énergie, au confort des occupants et à un certain dynamisme de l'architecture. Henriques et al. (2009), indiquent qu'un bâtiment sensible par une structure adaptative, vise ainsi à montrer le potentiel lumineux d'une architecture adaptative qui bonifie l'expérience sensorielle de l'espace architectural (Caglar, 2014). Le bâtiment Kiefer Technic Showroom par Ernst Giselbrecht & Partner et Al Bahar Towers, à Abu Dhabi par Aedas (voir figure I.4) sont des meilleurs exemples de cette architecture.



Figure I.4 : Al Bahar Towers, Abu Dhabi- Émirats arabes unis, par Aedas, 2012, (source : archdaily.com)

³ L'architecture sensible : la recherche de solutions formelles mieux adaptées aux activités des usagers et des changements environnementaux, en réduisant la masse de la construction et le coût de l'énergie.

⁴ La façade adaptative répond non seulement aux besoins qualitatifs et quantitatifs des occupants et utilisateurs, mais également aux besoins environnementaux liés à la lumière naturelle. Elle optimise les aspects quantitatifs du confort visuel et favorise les aspects qualitatifs de la diversité environnementale liée aux adaptations de la façade dans le champ visuel. Il y a deux sortes d'adaptation : la première ; une adaptation mécanique qui consiste à changer la forme en modifiant mécaniquement ses composants. La deuxième adaptation consiste aux moyens techniques basés sur les technologies comme l'éclairage et l'affichage, pour adapter les éléments

I.2. La lumière naturelle et le projet architectural

I.2.1. Rôles de la lumière naturelle dans le projet architectural

« Les architectes qui aujourd'hui dessinent des pièces ont oublié leur foi en la lumière naturelle. Assujettis à la facilité d'un interrupteur, ils se contentent d'une lumière statique et oublient les qualités infinies de la lumière naturelle grâce à laquelle une pièce est différente à chaque seconde de la journée. » – Louis Kahn, Silence et Lumière, 1996)

La lumière a un rôle non-négligeable voir primordial dans le projet architectural touchant les différents composants de ce dernier. La lumière est un élément architectural intangible, c'est une composante de l'objet architectural au même titre que l'enveloppe ou l'espace (Torre, 2007).

« La lumière est un élément constitutif de l'espace qui l'organise, le délimite par son immatérialité et le rythme par son mouvement. » (Chelkoff et Thibaud, 1992. Cité par Torre 2007). La lumière ne peut être ôtée du bâtiment, de son concept, de sa structure, de sa construction ou de l'environnement de travail en résultant (Torre, 2007). Il va au-delà en affirmant que le projet architectural doit être lu comme une harmonie d'espaces sous la lumière (Belakehal, 2007).

I.2.1.1. Génération / Révélation de la forme

« La clé est la lumière, la lumière illumine les formes et les formes ont un pouvoir émotionnel » Le Corbusier. La plupart des formes que nous percevons nous sont révélées par la lumière (Reiter, Herde, 2003). C'est de notre vision que nous tenons la majorité des informations concernant notre environnement. Ainsi, beaucoup de formes architecturales admirées ont été conçues en fonction de la lumière (Zemmouri ; M, 2013).

Tous les bâtiments expriment une attitude face à la lumière. Les formes restent constantes mais la lumière naturelle est perpétuellement changeante, du point de vue qualitatifs comme sur le plan quantitatif. Nous percevons la stabilité de la forme, nous la ressentons comme un élément fixe mais sa présentation peut changer totalement lorsque la lumière varie (Reiter, Herde, 2003). La forme transforme la lumière, comme le son et la chaleur ; elle la concentre, la réfléchit ou la disperse. La lumière accentue la forme, met la forme en évidence, comme elle peut dans certains cas faire dissoudre la forme (Cornier, 2006).



Mettre la forme en évidence

Figure I. 6 : JUBILEE CHURCH de Richard MIER (Source : www.adeenidesigngroup.com) consulté le 26/12/2015



Faire dissoudre la forme

Figure I. 5 : Heydar Aliyev Center de Zaha Hadid (source : www.ozartsetc.com) consulté le 26/12/2015

I.2.1.2. Mise en valeur des matériaux

« On peut dire que la lumière, donatrice de toutes présences, est créatrice d'un matériau et le matériau, ainsi créé, projette une ombre et l'ombre appartient à la lumière. » Louis I.Kahn

La lumière naturelle joue un rôle capital dans la mise en valeur d'une matière (Zammouri. M, 2013). C'est elle qui selon son intensité, son angle d'incidence, sa qualité et sa couleur va mettre en évidence la texture et la couleur de la matière et lui donner vie. A la lumière, une surface lisse brille alors qu'une surface rugueuse vibre, la couleur de la matière éclate ou s'estompe, son grain apparaît ou disparaît (Reiter, Herde, 2003).

Le choix des matériaux se révèle extrême important du point de vue émotionnel. Les échanges entre lumière et matière sont prépondérants dans ce domaine. L'éclat du verre. Le scintillement de l'or, la profondeur d'un bois foncé, les ombres créées sur un mur blanc émettent tous leur propre message, lié à un cadre culturel ou à une expérience personnelle. Certaines contrées possèdent des traditions et des matériaux qui correspondent à leurs conditions locales particulières (Herde. Reiter, 2003).

La lumière n'est pas seulement ce qui rend les choses visibles mais elle en est la substance même. La lumière naturelle est certainement un des plus beaux matériaux employés en architecture ; en revanche, les matériaux sont des clés pour comprendre le comportement de la lumière car ils affectent directement sa quantité et sa qualité (Herde. Reiter, 2003).



La lumière met en évidence le matériau

Figure I.7 : Musée Guggenheim F. Gehry
(Source : <http://www.routard.com>)

I.2.1.3. Définition de la structure

La structure influence d'une manière déterminante le caractère d'une ambiance lumineuse. Le choix de la définition structurelle engendre une première définition du traitement de la lumière. Inversement, à une certaine qualité de la lumière recherchée correspond un type de structure offrant une ouverture particulière (Herde & Reiter, 2003). Cette structure la laisse pénétrer dans l'espace avec générosité ou parcimonie, selon l'appropriation et le rapport au contexte souhaité (Zemmouri ; M, 2013). L'aération des masses par des percements « treillis rempli de trous lumineux » permet à la structure d'être infiltrée par la lumière et donne un effet aérien malgré la lourdeur des masses (Biron, 2008).

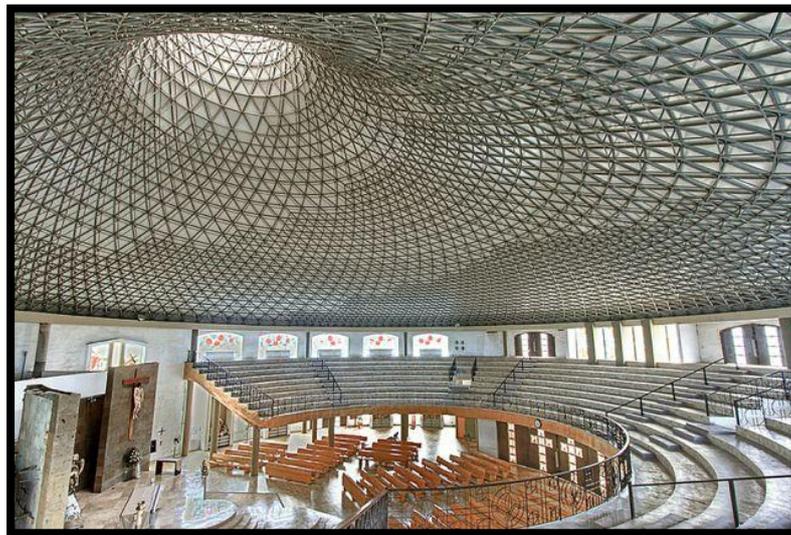


Figure I.8 le dôme émouvant de l'église San Juan à Monterrey, au Mexique (source : <http://geometrica.com>)

L'ouverture du toit au ciel est une autre stratégie suggérée pour éliminer l'effet de poids. La structure n'en paraîtrait pas moins lourde extérieurement. Cependant, tout en conservant les

parties du volume, mais en les scindant ou les détachant l'une de l'autre par de simples filets lumineux, on peut diminuer l'effet de poids ou de lourdeur. Kahn est d'ailleurs un spécialiste de cet effet (Biron, 2008).

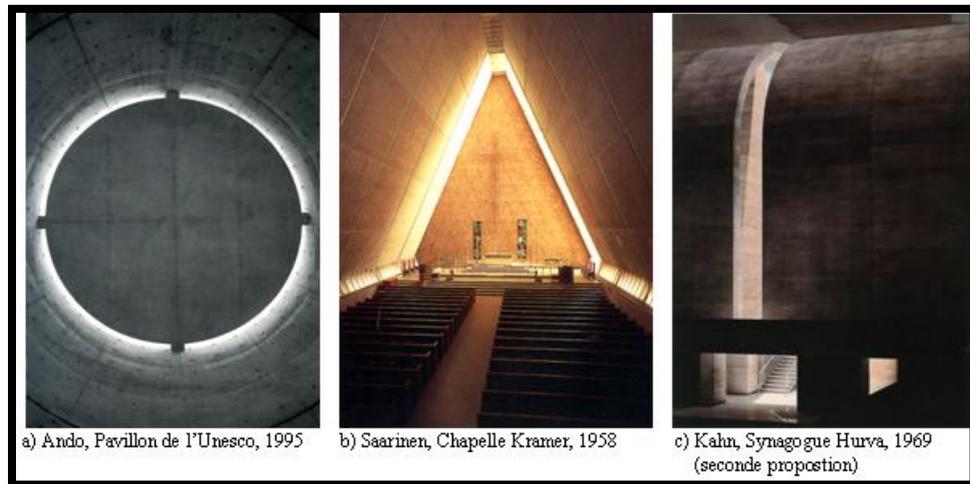


Figure I-9 : Division de la masse par le décollement de ses parties à l'aide de fentes lumineuses
(Source : Biron, 2008)

La lumière naturelle peut être révélatrice des aspects intrinsèques de la structure d'un bâtiment, en mettant en évidence des détails d'assemblage ou de composition. Elle peut avoir aussi une fonction dissimulatrice rendant ainsi la structure flottante, immatérielle ou même complètement absente (Gallas, 2013)

I.2.2. Manifestations / Effets de la lumière naturelle dans l'espace architectural

La lumière influence l'espace architectural de trois manières. **Fonctionnelle**, qui s'exprime par le confort lumineux, **esthétique** ; apercevoir l'espace qualitativement par un jeu de couleur, d'ombre et de lumière. Et enfin **émotionnellement**; par l'affectation sensible des différents effets lumineux (Belakehal, 2007).

I.2.2.1. La lumière sert de lien entre l'intérieur et l'extérieur :

Dans l'exemple de la fondation Lang, La paroi totalement vitrée paraît supprimer la barrière entre l'intérieur et l'extérieur. L'architecte développe réellement une interpénétration entre l'espace intérieur et la nature qui l'entoure. Aucune différence de luminosité marquante ne se perçoit entre intérieur et extérieur, si bien que le paysage entre véritablement, avec sa lumière, dans l'espace interne.



Figure I.10 : La Fondation Lang Tadao Ando (source : <http://www.cgarchitect.com>)

I.2.2.2. La lumière sépare les espaces intérieurs :

La lumière peut participer dans la séparation des espaces. Elle peut jouer un rôle important dans la séparation, car elle peut attribuer des caractères différents aux deux faces d'une même paroi.

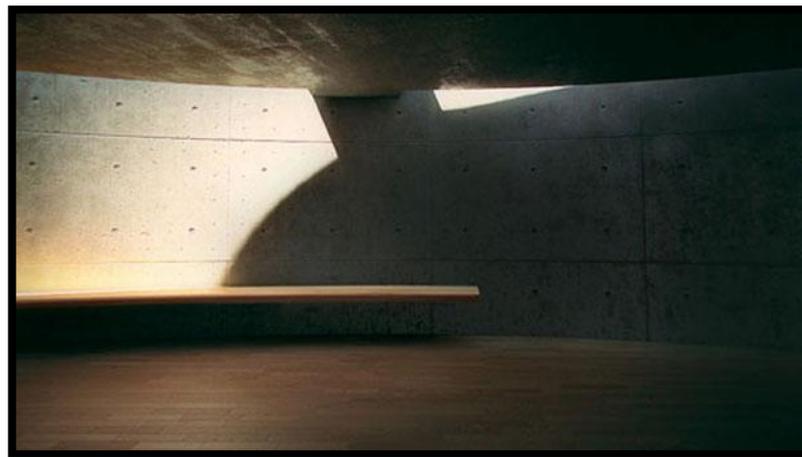


Figure I.11 : Koshino House par Tadao Ando (Source : <http://trendland.com>)

I.2.2.3. La lumière divise l'espace :

La lumière peut définir plusieurs zones à l'intérieur d'un volume simple. Le jeu subtil sur les variations d'intensités lumineuses offre une perception de l'espace. L'exemple du pavillon d'exposition de Barcelone de Mies Van Der Rohe montre comment la lumière différencie des espaces interpénétrés. Ainsi, on remarque une division de l'espace par la lumière (Chaabouni, 2011).



Figure I.12: Pavillon d'exposition de Barcelone de Mies Van Der Rohe
(Source : <http://biztravels.net>)

I.2.2.4. La lumière unifie l'espace :

La lumière assume une fonction unificatrice de l'espace. La distribution égale de la lumière sur toutes les surfaces d'un édifice ou d'un espace intérieur favorise son unité. La couleur claire des parois favorisent la réflexion de la lumière, qui très homogène unifie l'espace. La présence d'un sol ou d'un plafond très réfléchissant, sur lequel la lumière s'étend facilement, peut également jouer un rôle essentiel dans l'accentuation de l'unité du local. (Zemmouri M, 2013).



Figure I.13 : House of the infinite Campo BAEZA (source: <http://www.detailsdarchitecture.com>)

I.2.2.5. La lumière qui dirige :

L'homme a toujours été attiré par la lumière. Elle est le moyen pratique et poétique pour promouvoir une orientation à toutes les échelles de l'environnement bâti. Elle est aussi un

moyen de communication : elle peut définir un point d'attraction, souligner un axe, renforcer une organisation hiérarchique de l'espace ou encourager un mouvement (De Herde, Reiter, 2001). La lumière participe à l'accentuation d'une direction créée par la forme architecturale de la pièce (Chaabouni, 2011).

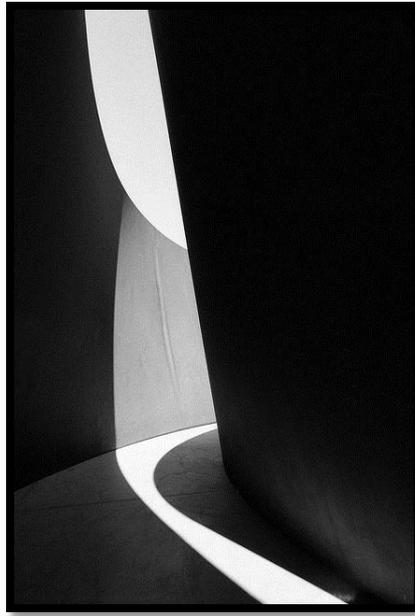


Figure I.14 : Projet de Richard Serra
(Source : <http://art-tech.over-blog.com>)

I.3.2.6. La lumière crée un lieu focal :

La lumière est l'élément primordial de la mise en valeur d'un édifice ou d'un monument, c'est par la lumière que l'on peut mettre en relief une forme ou un espace. Créer un lieu focal par la lumière est synonyme de l'importance qu'on lui attribue, ainsi, le regard est orienté dans la lecture de l'espace. Le point d'attraction apparaît plus lumineux que son environnement. Notre regard est inmanquablement attiré vers les points présentant les plus fortes luminances (Chaabouni, 2011).

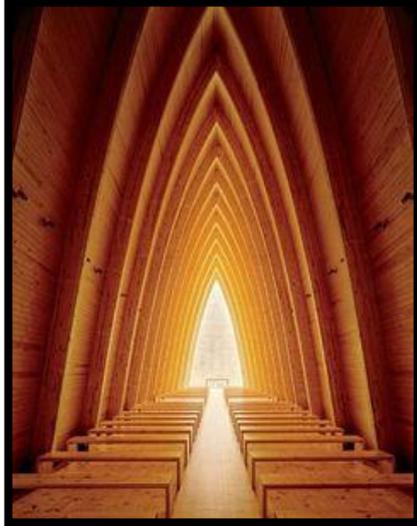


Figure I.15 : stunning church Finland (source: <http://goodwoodwould.tumblr.com>)

I.3. Le dialogue entre la lumière et l'architecte-concepteur

La lumière naturelle est considérée par les architectes comme un matériau de conception et de formalisation de leurs idées et leurs intentions (Biron, 2008). Ce matériau est modelé, adapté et sculpté pour matérialiser ou mettre en relief l'espace architectural. Dans le travail de sa thèse de Doctorat à l'université de LORRAINE, Salma Chaabouni a établi que parmi les premières préoccupations qui se formulent chez les concepteurs lors de leur expression des intentions portent sur **la qualité de distribution** de la lumière, **le choix des dispositifs**, **les effets de la lumière**. Les conceptions les plus intenses sont celles qui savent orienter la lumière en des formes spécifiques relatives au bâtiment et à sa vocation, plutôt qu'un éclairage ambiant uniforme et sans événement (Biron, 2008).

Afin de montrer de manière plus claire le dialogue entre l'architecte et la lumière lors de la conception architecturale, une série de projets sera présentée dans ce qui suit. Le choix des architectes s'expliquent notamment par la notoriété internationale et leurs manières de traiter la lumière et l'espace.

I.3.1. Walter Gropius

Gropius l'un des acteurs clés de l'avant-garde européenne qui donnera naissance au fonctionnalisme et au Style international, l'accès à l'air frais et au soleil amoindrirait le besoin en espace habitable (Belakehal, 2007). Il réfuta ainsi la conception de la fenêtre comme un orifice dans le mur et prôna pour le mur rideau. Il fut le premier à mettre en œuvre cette conception dans le projet de l'usine Fagus, réalisée en 1911 en Allemagne, il a construit aussi un bâtiment manifeste, révolutionnaire le Bauhaus de Dessau, ce bâtiment fera date

dans l'histoire de l'architecture moderne, Le bâtiment est composé de deux corps en forme de « L » lui donnant un dynamisme, une forme tendant vers la rotation. Cette forme rayonne par rapport à un paysage.

Un effet fascinant de transparence et de réflexion était créé par la grande paroi de verre des ateliers. Pendant la nuit, le bâtiment tout entier, éclairé de l'intérieur, devenait une sorte de modulateur de lumière, transparent, qui exprimait le dynamisme de l'espace ouvert mais articulé (Foura. M, 2005).



Figure I. 16 : le Bauhaus de Dessau Walter Gropius (source : <http://www.mesallemagnes.net.html>)

I.3.2. Ludwig Mies van der Rohe

« Que seraient le béton et l'acier sans le verre ? »

Mies van der Rohe est le premier à poser la question du vide et de la lumière dans l'architecture (site internet)⁵. Il a exposé ces principes de l'enveloppe transparente à travers le Pavillon d'Allemagne réalisé pour l'exposition universelle de Barcelone en 1929 et Institut de technologie de l'Illinois 1942. Ses intentions et ses dessins ont pu se matérialiser avec l'évolution des techniques de fabrication des panneaux de verre et des châssis en acier. Ces derniers ont remplacé le mur et sa massivité par des surfaces vitrées totalement transparentes et légères générant une continuité d'éclairage entre l'espace intérieur et l'environnement extérieur (Belakehal, 2007).

⁵ <http://www.miessociety.org/speeches/banquetspeech/>



Figure I.17 : Institut de technologie de l'Illinois Ludwig Mies (1942) (source : <http://www.miessociety.org>)

I.3.3. Frank Lloyd Wright

La contribution de Wright, dans le domaine de l'éclairage naturel consiste de manière générale en des connaissances d'ordre qualitatif (Belakehal, 2007). Aucunement, il utilisa des calculs ou des modélisations d'éclairage naturel pour élaborer ses projets. Les résultats qu'il a obtenus sont plutôt le fruit de son intuition et son sens de l'observation. Par ailleurs, il insista sur l'emploi de la lumière naturelle en architecture en disant, entre autres : laissez-le (l'architecte) travailler, maintenant, avec la lumière diffuse, la lumière réfractée, la lumière réfléchie, utiliser la lumière pour son bien-être et son plaisir (Belakehal, 2007). Dans le musée Guggenheim, la lumière est un élément de grande importance. La lumière naturelle entre en cascade par la coupole centrale, et par les lucarnes disposées en bandeau, à intervalles réguliers, réglées par des persiennes semi-transparentes qui suivent le mouvement ascensionnel de parois courbes.

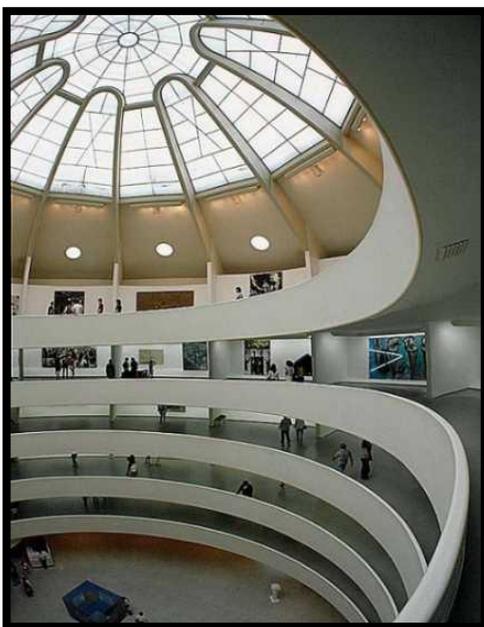


Figure I.18 le musée Guggenheim, (source : <http://newyorkmania.fr>)

I.4.4. Alvar Aalto

L'architecte moderniste finlandais Alvar Aalto a conçu des mécanismes⁶ d'éclairage naturel innovants et exemplaires. Malgré le faible ensoleillement sous des latitudes qualifiées d'arctiques, l'architecte nous plonge dans des ambiances lumineuses d'une grande qualité. (Thiry, 2014). Aalto étudia minutieusement l'éclairage naturel de ses projets à travers des modélisations par des maquettes. Pour lui, en effet, l'architecture était une combinaison et intégration de techniques (Thiry, 2014). Le contraste et les gradients variés de lumière naturelle étaient parmi les signaux alternants caractéristiques de son architecture.

Les édifices d'Aalto, en particulier les bibliothèques, ont attiré l'attention des historiens de l'architecture et de certains chercheurs dans le domaine de l'éclairage. Toutes ces investigations ont montré que les techniques d'éclairage qu'Aalto employa dans ses projets parvenaient à éliminer toutes sources d'éblouissement et de gêne visuelle (Belakehal, 2007).

Le croquis de l'architecte finlandais Alvar Alto (figure 19) représente le dessin des rayons lumineux arrivant jusqu'à l'utilisateur selon des directions différentes montre des préoccupations par rapport à une distribution homogène de la lumière dans le but d'éviter la présence des ombres gênantes. Ainsi, ce croquis montre des préoccupations liées principalement à la dimension d'usages : la représentation d'un personnage en train de lire un livre montre une préoccupation particulière par rapport à la fonction du lieu : bibliothèque (Chaabouni, 2007).

Dans une étude de Jean-Denis Thiry université de Louvain, pour objectif de tester de manière théorique, les «mécanismes lumière» aux conditions d'ensoleillement extrême. (Figure 21) Cette étude a montré la logique architecturale qui régit la conception des dispositifs de prise de lumière chez Aalto et la pertinence de ces «mécanismes-lumière» nous donnent la preuve, en tous points, du génie d'Alvar Aalto et de l'exigence de son travail.

6 Un «mécanisme-lumière» est un dispositif capable de guider la lumière naturelle depuis l'extérieur vers l'intérieur d'un bâtiment, avec une intensité et une directionnalité maîtrisées, dans le but de répondre aux besoins d'usages donnés (Thiry, 2014).



Figure I.20 : La bibliothèque de Wolfsburg
(source : Thiry, 2014)

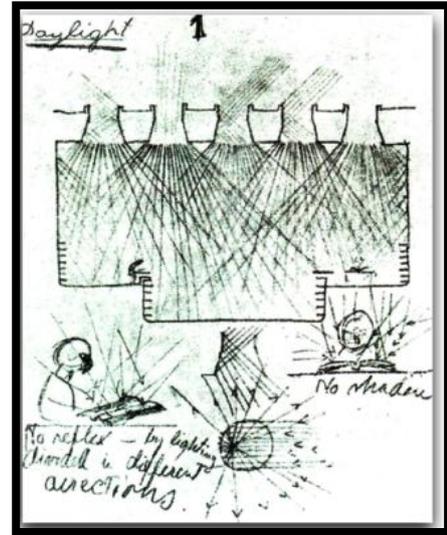


Figure I. 19: la bibliothèque de Wolfsburg
Aalto (1959-1962) (source : Chaabouni, 2013)

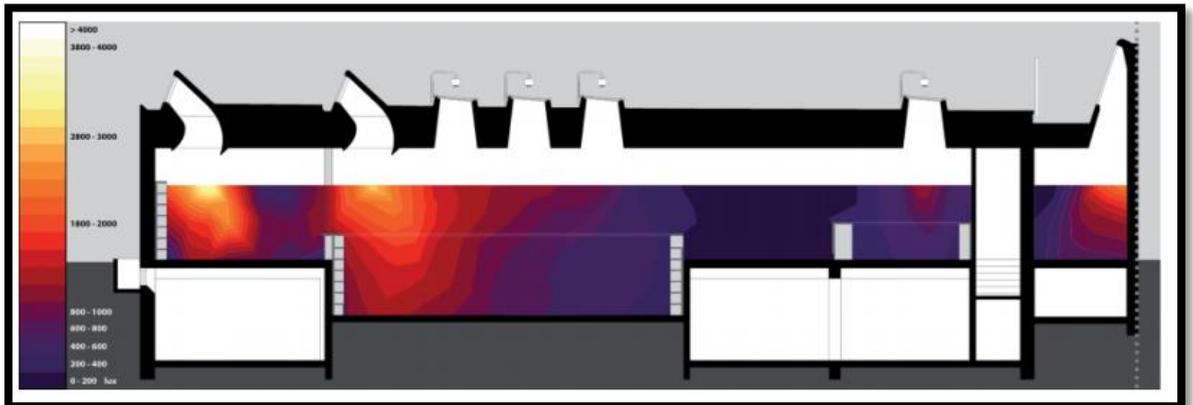


Figure I.21 : Représentation fausses-couleurs de la bibliothèque de Wolfsburg; relevé du 13-09-2011; 13h00-14h00; ensoleillement extérieur de 35000 à 37000 lux. (Source : Thiry, 2014)

I.3.5. Louis Kahn

« Je perçois la lumière comme source de toutes présences »

Louis Kahn fait parti des artistes avant-gardistes qui considèrent la lumière comme vecteur du processus de création. Pour Kahn le projet architectural doit être lu comme une harmonie d'espaces sous la lumière. Il refusait le principe d'un éclairage universel et prônait pour un éclairage singulier approprié pour chaque espace (Belakehal, 2007).

Dans le projet du musée **Kimbell**, Kahn a dessiné un croquis (figure 23) montre plusieurs variantes concernant la forme de la protection à mettre en place et qui aura pour rôle de

dévier les rayons solaires pour permettre une pénétration indirecte des rayons lumineux. Ceci traduit une préoccupation particulière par rapport au choix des dispositifs et par rapport à la qualité de distribution de la lumière (Chaabouni, 2007).

Une étude de SEDA & BENSON (2013) (*site internet*)⁷ a été montrée en termes qualitatifs et quantitatifs que le musée Kimbell a une luminance uniforme sous les lanternes. Le plafond de la voûte fonctionne comme un réflecteur de lumière (figure 22).

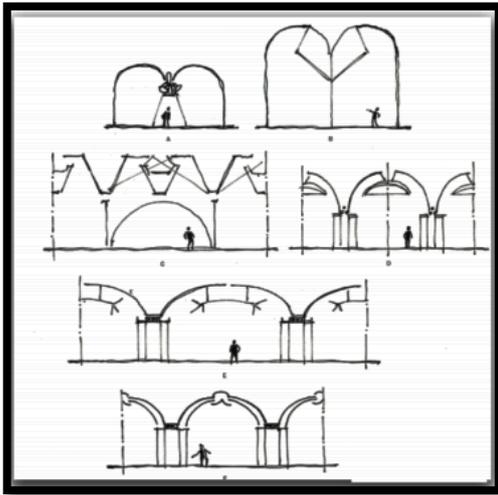


Figure I.23 : Croquis dessiné par Louis I Kahn, The Kimbell Art Museum (source : Chaabouni, 2011)

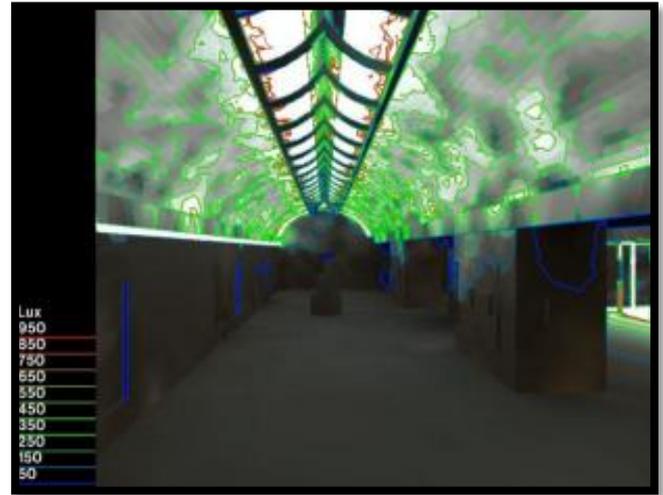


Figure I.22 éclairage de la Galerie Une zone intérieure au Kimbell dans des conditions de ciel ensoleillé pour le solstice d'été lignes isolux de contour. (source : SEDA , BENSON ,2013)

Malheureusement, l'examen des autres œuvres de Kahn, montre quelques contradictions avec ses déclarations (Belakehal, 2007). Ses bâtiments sont élégants, mais construits avec des matériaux bruts. Ses constructions modernes s'inspirent de formes anciennes. Ses bâtiments aux fonctions laïques comportent des espaces sacrés (Biron, 2008). Pour la bibliothèque de l'Académie Philips Exter, il logea plus de six différentes fonctions derrière une paroi ayant des ouvertures de tailles identiques. Dans plusieurs de ses édifices, on constate des rajouts opérés par les occupants en vue d'y améliorer l'éclairage naturel et y contrôler l'ensoleillement. Rideaux, écrans verts et écrans en treillis font partie des éléments qui ont été placés, pour atteindre cet objectif (Belakehal, 2007). Et même pour le bâtiment de l'assemblée à Dacca, des études ont montré que l'éclairage naturel n'est pas totalement

⁷ Investigation of the Luminous Environment in Louis I. Kahn's Kimbell Art Museum A qualitative and quantitative study <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1169320/file.pdf>

satisfaisant selon le point de vue des occupants. Certains espaces bénéficient d'un éclairage naturel insuffisant, parfois inadéquat et même éblouissant (Belakehal, 2007).

I.3.6. Le Corbusier

« L'architecture est le jeu savant correct et magnifique des volumes sous la lumière »

La lumière naturelle est omniprésente dans la poétique corbuséenne. Le Corbusier montrera cet intérêt envers la lumière naturelle autant dans ses projets que dans ses discours qui constituaient, en soi, une théorie sur l'éclairage naturel. A travers cette théorie, il stipula qu'un espace lumineux cause un saisissement joyeux alors que l'obscurité en provoquait un autre froid (Belakehal, 2007).

Les croquis de Le Corbusier (Figure 24) peuvent déduire l'intention de l'architecte qui consiste à rechercher une lumière mettant en valeur l'autel. Et aussi concerner la dynamique de la lumière naturelle. Ainsi, ces croquis montrent des préoccupations particulières par rapport à l'effet de la lumière sur la perception de l'espace (Chaabouni, 2007)

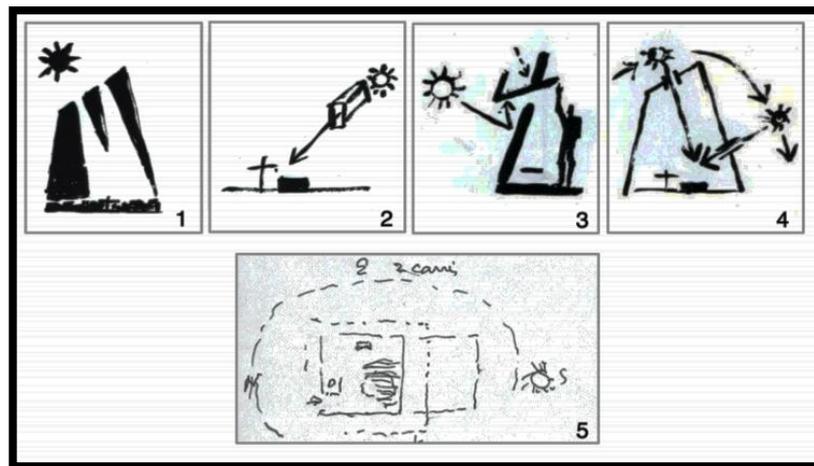


Figure I.24 : Dessins de Le Corbusier, Eglise saint-Pierre (Les carnets de croquis de Le Corbusier)
(source : Chaabouni, 2011)

Chose véritablement désolante est que des œuvres aussi lumineusement poétiques que celles de Le Corbusier connaissent des modifications qui remettent en cause tout le sens poétique et toute la technique développée qu'il attribue à la lumière naturelle dans son architecture. La cité Frugès à Pessac est le projet qui a démontré d'abord que l'esthétique universelle présentée par Le Corbusier ne peut être aussi acceptée qu'il le souhaite (Belakehal, 1995).

I.3.7. Jean Nouvel

« L'architecture est la lumière et le matériau ».

Jean Nouvel est, à présent, une des figures les plus emblématiques de l'architecture française, voire européenne. Ses projets, et même sa carrière, ne passent pas sans médiatisation grandiose (Belakehal, 2007). Jean Nouvel affirme que l'architecture s'intéresse de plus en plus au vivant. A ses nouvelles dimensions interactives, il associe, entre autres, la lumière et ses intensités.

Dans le projet d'Institut du Monde Arabe (IMA) ; Nouvel créa une prouesse technologique, une façade en dentelle métallisée qui consiste à des moucharabiehs à la délicatesse d'un mécanisme d'horlogerie et la sophistication d'une mosaïque. Son ouverture est gérée par un programme informatique qui analyse la luminosité du ciel et qui en modifie l'ouverture périodiquement (Livret IMA, 1997)

Au niveau de la salle d'exposition, par exemple, il est arrivé que les ouvertures des diaphragmes soient occultées pour protéger les œuvres d'une forte lumière. Quoique les employés trouvent que le jeu de lumière est une attraction pour le public, certains pensent que l'intérieur n'est pas très adapté pour le travail. Des bureaux sont dépourvus de lumière naturelle : une situation qui conduit les occupants vers l'usage de l'éclairage artificiel dans un bâtiment transparent (Belakehal, 2007).



Figure I.25 : La bibliothèque de L'IMA source (Belakehal, 2007)

Effets inattendus des diaphragmes de l'IMA : taches solaires sur tables dans les salles de classes de lecture de la bibliothèque. (Source : Belakehal, 2007)

I.3.8. Richard Meier

" Pour ressentir un bâtiment, il faut s'en imprégner et sentir la lumière "

Dépassant la transparence des modernistes, la lumière naturelle est utilisée par Meier pour sculpter des relations spatiales entre les composantes du bâtiment. Pour lui, la lumière naturelle dépasse le statut d'objet et équivaut à l'espace même. Au sujet des individus, la lumière est omniprésente, un des matériaux constitutifs de son architecture.

Le musée de *Burda* conçu en 2004 par Richard Meier montre une technique exemplaire pour la gestion de la lumière du jour. Cette dernière a été introduite au bâtiment sans dépasser les intensités lumineuses autorisées, un système pare-soleil et de guidage de lumière innovant a été réalisé qui maintient l'éclairage intérieur à une valeur constante (*site internet*)⁸. Quatre chemins lumineux de deux couleurs de lumière permettent de reproduire dans la grande salle du musée les variations naturelles de la lumière au fil des saisons et de souligner la couleur prédominante des tableaux d'un étage. Pour lui, le blanc est tout : « *Le blanc est la lumière, l'outil indispensable pour comprendre et pour transformer* »,



Figure I.26 : Musée Burda Richard Meier (source : <http://www.bachhuber-hoteleinrichtungen.de/gallery/frieder-burda-museum/>)

⁸ https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/FR/AWB_Kunst_und_Kultur.pdf

I.3.9. Norman Foster

« J'ai une passion particulière pour la lumière dont on peut la guider et la réfléchir dans ces espaces ses changement, constants et comment elle peut susciter ou rechausser l'expérience architectural ; je suis fasciné de voir comment l'espace peut devenir pôle d'attraction, théâtre de mouvement, et comment ce même espace peut détendre, imposer ou éloigner »

Sir Norman Foster est l'une des plus grandes signatures de l'architecture de notre temps qui, même en amont de leurs conceptions, ont été connus pour leur utilisation de la lumière naturelle. Il considère les apports qualitatifs de la lumière naturelle autant pour les intérieurs que ceux qu'elle peut exprimer à travers les façades (Belakehal, 2007).

Parmi les projets dans lesquels Norman Foster a adopté le principe de l'utilisation optimale de la lumière naturelle dans tous les espaces du bâtiment La Hearst Tower (New York, USA) un exemple de l'architecture où la technologie est un support à la qualité d'une œuvre, puisque la domotique et les avancées structurales ont permis de créer un immeuble efficace aux espaces intérieurs d'une immense qualité. (Fig. 27) explique parfaitement plusieurs concepts ainsi que les moyens utilisés afin de parvenir à bien les réaliser. Tout d'abord, la dimension environnementale est atteinte grâce aux atriums qui permettent l'entrée de lumière naturelle et une circulation d'air contrôlée. De plus, par leur décalage, ils offrent des vues sur les paliers inférieurs participant de ce fait à la dimension humaine. Le noyau structural et fonctionnel central est également figuré ici. Il permet cette rotation des atriums de même que l'apport en lumière naturelle loin dans l'édifice et la possibilité aux usagers d'avoir des vues extérieures sans l'encombrement de colonnes.

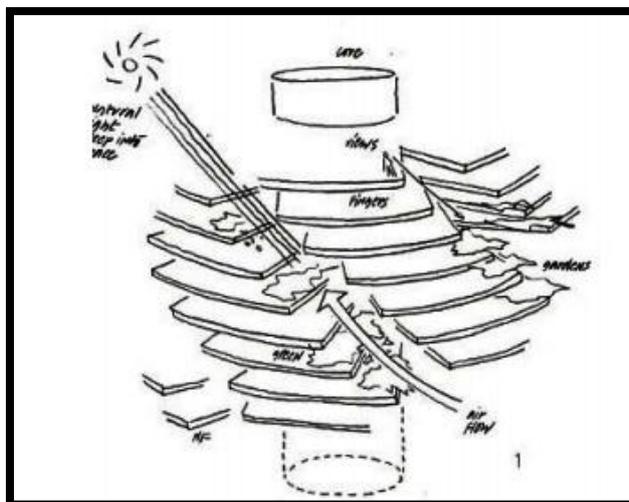


Figure I. 27 Normand Foster (source: www.fosterandpartners.com)

I.3.10.Tadao Ando

« La lumière est l'origine de tout être »

Tadao Ando est l'un des personnages les plus marquants de l'architecture japonaise contemporaine. Ces œuvres sont souvent axées sur l'épuration des formes et des espaces, avec des matériaux bruts et des formes géométriques aérées (Biron, 2008). Ando utilise la lumière naturelle dans ses conceptions : une lumière abstraite. Dans ses bâtiments, les jeux de lumière et d'ombre servent pour une théâtralisation plus que pour la vie quotidienne. Car pour lui, l'espace est autre chose que le lieu qu'un habitant maîtrise. Toutefois, il était pour une architecture qui préservait le contact de l'homme avec la nature et qui, en même temps, lui offrait plus d'indépendance (Belakehal, 2007).

Les matériaux très texturés et les formes géométriques proéminentes accueillent la lumière comme une composante formelle qui dirige fortement la lecture et le rythme de l'ensemble (Karole Biron, 2008). Les forts contrastes lumineux dans les intérieurs conçus par Tadao Ando sont donc le fruit de son intuition et de son interprétation personnelle (Belakehal, 2007).

Les espaces qu'il conçoit sont caractérisés par une pénétration zénithale dramatique de la lumière naturelle conduisant à de forts contrastes entre lumière et ombre. Lorsque la lumière provient des parois latérales, à travers des briques de verre surtout, l'ambiance lumineuse y est plus douce. A cette pénétration de lumière il associe celle du vent pour mettre encore plus en rapport construction et nature (Belakehal, 2007).

Tadao Ando travaille la lumière dans tous ses projets. Dans la maison Koshino, la lumière rythme et scinde l'espace en deux séquences. Dans la première règne la lumière, dans la seconde l'obscurité. Cette répartition correspond à la séparation jour/nuit. Tadao prouve ainsi que la forme n'est pas la seule réalité de l'espace, ombre et lumière jouent ainsi un rôle important. Elles déterminent l'apparence que peut prendre le béton

Quatre types d'ouvertures remarquables sont à signaler : ouverture sérielle, ouverture en baie de plein pied, ouverture en baies hautes et ouvertures zénithales (site internet)⁹.

⁹ http://portfolio.leone.free.fr/photo_album_fichiers/koshino.pdf

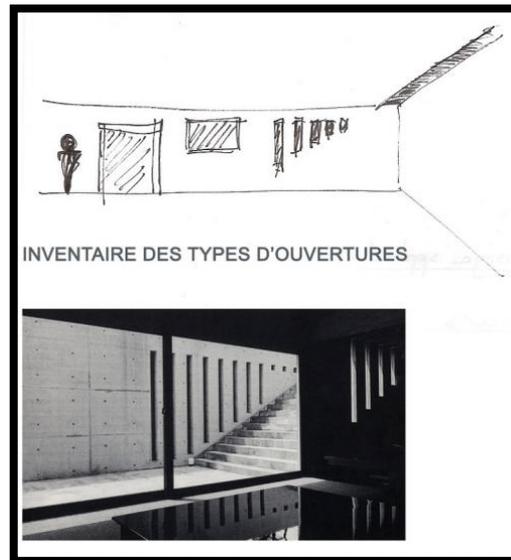


Figure I.28 la maison Koshino Tadao Ando (source : <http://portfolio.leone.free.fr>)

I.3.11. Alberto Campo Baeza

« La lumière est le matériau le plus luxueux que les architectes puissent utiliser, mais vu qu'elle ne coûte rien, ils l'oublient souvent. La lumière est un matériau, au même titre que la pierre. Elle a un corps, une consistance que nous pouvons contrôler et gérer ».

Alberto Campo Baeza est un architecte espagnol, considéré comme l'un des architectes de la lumière. D'après lui, la lumière et l'architecture sont l'air et la musique. Quand l'air traverse l'instrument, il crée la musique. De même, quand la lumière traverse l'espace... elle crée l'architecture. Si la quantité de lumière est importante, la qualité doit l'être aussi (Lighting Magazine, 2014)



Figure I. 29 : Zamora Offices, Zamora, Spain, 2012 Alberto Campo Baeza
(source: <http://udis-tmc.blogspot.com>)

Dans les croquis de l'architecte Alberto Campo Baeza (Figure 30, 1 et 2), le dessin des rayons lumineux peut refléter une recherche d'un effet de lumière sur la perception visuelle de l'espace par la mise en place d'un type particulier d'ouvertures (Salma Chaabouni, 2007).

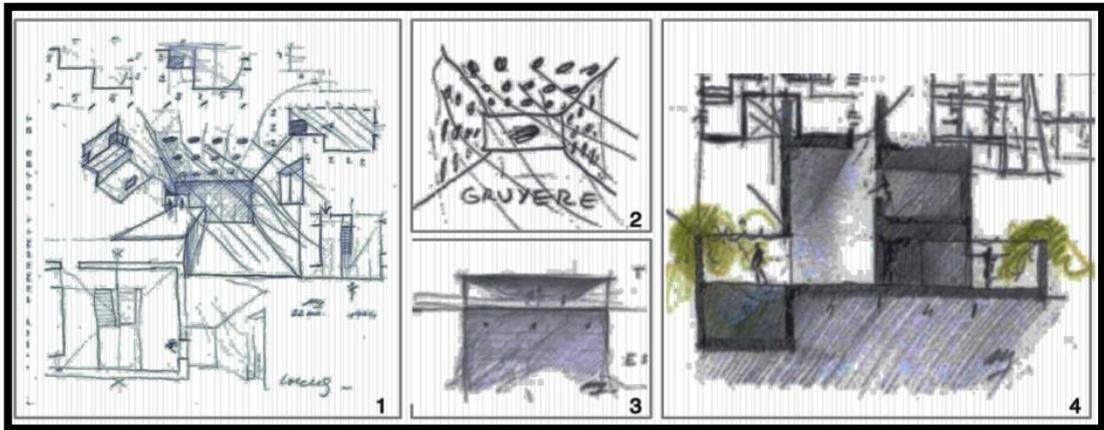


Figure I.30 Les croquis de l'architecte Alberto Campo Baeza (source : Chaabouni, 2013)

I.3.12. Steven Holl

Considéré comme un des architectes les plus importants d'Amérique, Steven Holl est reconnu pour son agilité à tordre avec grande sensibilité l'espace et la lumière. La plupart des projets de Holl parviennent à rendre lisible leur rapport à l'éclairage naturel. Que ce soit

la forme des espaces proposés, ou le jeu des ouvertures, ses bâtiments sont autant d'expériences sur ce que la lumière rend possible (site internet)¹⁰

Holl annonce que « *Créer un musée peut être assimilé à construire un lieu pédagogique. Un grand espace peut être un lieu propice à l'enseignement. La sensation du matériau et de la lumière, les perspectives se superposant lorsqu'on se déplace à l'intérieur du bâtiment, tout cela peut former une séquence de potentiel émotionnel. L'architecture d'un musée peut faire émerger une atmosphère de réflexion, devenant ainsi une destination d'enseignement et d'interaction* »

La conception du Musée de la ville de Cassino, par Steven Holl, a nécessité l'utilisation de modèles physiques et de lumière non modélisée par ordinateur, afin de bien suivre la séquence et les transitions spatiales organisées comme des emboîtements de sections lumineuses. Chaque passage entre les sections génère un intervalle équivalant à un silence en musique. La lumière naturelle projetée est modelée sous forme de dessins géométriques. L'architecte se sert des percées et des fissures dans le mur pour introduire la lumière et pour décomposer le mur.

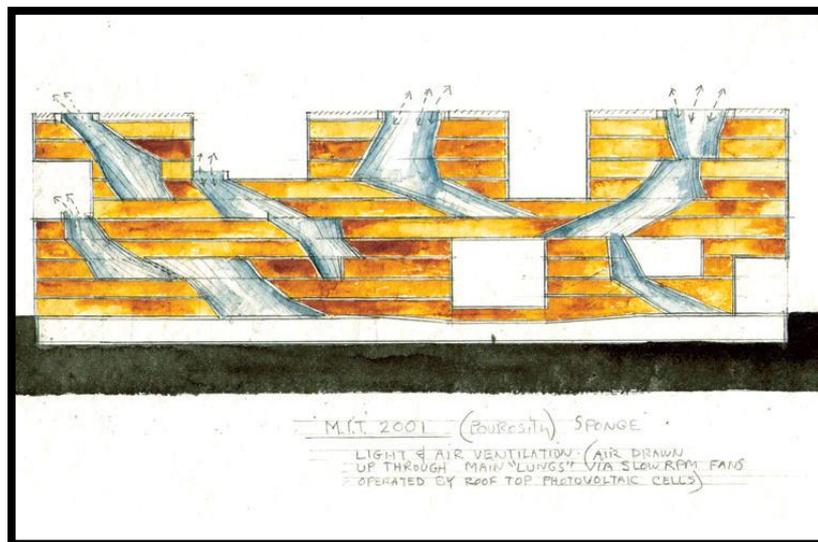


Figure I.31: SIMMONS HALL, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY Cambridge, MA, United States, (1999 – 2002) (source: <http://www.archdaily.com>)

¹⁰ <http://www.arcentreve.com/Pages/2011/steven-holl02.html>

I. CONCLUSION

Les premières manifestations de conception consciente de la lumière du jour sont constatées particulièrement dans les constructions sacrées, dont l'usage religieux ou symbolique. (Seringe, 1985). Les bâtisseurs et les architectes cherchaient à satisfaire et à trouver des solutions techniques aux exigences liées à la maîtrise et au contrôle de la lumière naturelle. Un matériau que l'homme a su modeler de diverses manières et pour des objectifs variés. Il a toujours fasciné les architectes qui la considèrent comme génératrice et révélatrice de leurs œuvres.

La lumière est une matière changeante, évolutive, mouvante. Ainsi la lumière est un élément fondamental dans la conception architecturale, sans lumière la construction ne serait qu'un objet perdu dans l'espace et n'ayant ni âme, ni sens. Un élément déterminant de l'espace et la forme architecturale ainsi qu'un élément fondateur de son ambiance. Il sert à l'émergence de nouveaux concepts et principes de l'architecture moderne et poste moderne.

Actuellement, La problématique de l'utilisation de la lumière est au centre des réflexions en ce qui concerne les enjeux actuels pour une architecture respectueuse de l'environnement, elle doit être un composant essentiel d'une philosophie qui reflète une attitude plus responsable et plus sensible de l'être humain par rapport au milieu où il vit.

Nous avons essayé d'établir, au cours de ce chapitre, une lecture générale des rapports qui relient la lumière naturelle et l'architecture. Nous avons commencé par retracer le rôle et les implications de la lumière naturelle dans les évolutions majeures qui ont marqué l'histoire de l'architecture. Après Nous avons identifié la relation de la lumière naturelle dans espace architectural. Nous avons vu également quelque architecte de la lumière comme Alvar Aalto, Louis Kahn, Mies Van Der Rohe, Le Corbusier, Tadao Ando et bien d'autres encore ont saisi le rôle remarquable de la lumière comme matière et ont démontré, par leurs travaux, comment une composition subtile de la lumière peut offrir à un espace toute sa richesse architecturale et qualité spatiale. Les architectes de la lumière ont formulé ses intentions en rapport particulier à des considérations usagères et esthétiques. Ces préoccupations peuvent porter sur la qualité de distribution de la lumière, le choix des dispositifs, les effets de la lumière.

CHAPITRE II : L'AMBIANCE LUMINEUSE DANS
LES SALLES DE CLASSE.

" La lumière du jour est une chose très complexe qui affecte notre façon de voir et influence aussi nos processus biochimiques de façon à modifier notre vigilance."

[L. HESCHONG, 1999]

II. INTRODUCTION

« *L'espace de la classe, blanc, lumineux, bien proportionné l'avait fascinée et l'avait décidée à devenir architecte. J'étais ému de l'écouter* » Baeza, C. (Site internet)¹¹. La conception d'espace scolaire répondant à l'exigence socioculturelle, climatique et économique a été toujours considérée par les architectes comme une tâche difficile. Cela car cette espace a trait directement non seulement sur la formation de l'individu, mais à son avenir à savoir, l'épanouissement de sa personnalité et son intégration dans la société (Abdelatia, 2013).

Les espaces scolaires se doivent également d'être adéquats et favorables au travail et à la santé des élèves et des enseignants. Ils se doivent de plus en plus écologiques et d'intégrer au maximum des solutions en faveur du développement durable. La lumière du jour est une technologie gratuite, qui a un impact important sur l'expérience éducative des écoliers ; si nous l'appliquons de manière durable, il devient possible d'améliorer les conditions environnementales d'une salle de classe. De nombreux auteurs ont étudié ces dernières années l'effet des conditions d'éclairage naturel, sur la santé, le bien être, le rendement scolaire, et la réduction de l'absentéisme (Iturra, 2011).

La lumière naturelle tient un rôle important dans l'architecture scolaire, Les établissements existants et les approches connues pour en créer de nouveaux ne répondent plus aux exigences présentes, la nouvelle demande appelle de nouvelles solutions en terme d'éclairage naturel. Les établissements doivent répondre aux besoins répertoriés et identifiables d'aujourd'hui, mais également aux demande incertaines du futur.

Ce chapitre mette l'accent sur l'état de l'art de l'éclairage naturel dans les salles de classe afin d'apprécier l'avancée des recherches et des normes sur la question de l'éclairage dans ces espaces ; ce chapitre évoque aussi les mutations de l'espace scolaire à l'ère du numérique pour objectif de comprendre les nouvelles exigences en terme d'ambiance lumineuse.

¹¹ http://www.lecourrierdelarchitecte.com/article_3568

II.1. État de l'art de l'éclairage dans les salles de classe

II.1.1. Premières réflexions autour de l'importance de l'éclairage dans le monde :

Dès le début du XXe siècle, l'utilisation de la lumière naturelle dans les écoles rêvait un intérêt spécial dans les pays développés. Les spécialistes américains et anglais ont été les premiers à reconnaître l'importance physiologique et psychologique de la qualité d'éclairage dans les locaux d'enseignement (*Roth, A., 1966*).

Les premières écoles éclairées bilatéralement ont été construites en Angleterre avant la première guerre mondiale. Sans omettre quelques exemples hérités des années vingt en Allemagne et en Hollande, qui représentent la même idée. Premièrement dans les écoles pavillon, puis sous d'autres formes d'écoles (*Ben cheikh, 2013*).

Sachant que jusqu'à la deuxième guerre mondiale les moyens d'éclairage prédominants dans les écoles sont les fenêtres et d'une façon réduite des lampes incandescentes. Dans celles construites au début du XXe siècle, le besoin en éclairage naturel était assuré par des fenêtres latérales à haute allège, ce qui empêchent les élèves d'avoir une vue complète sur l'extérieur en même temps (*Minier, F., 2001*). Autres chercheurs interpellés par ce sujet et notamment par la tendance de la conception des écoles sans fenêtres aux États-Unis, ont fait des recherches sur l'importance des ouvertures et de la lumière naturelle. Parmi eux, nous pouvons citer B. COLLINS qui a trouvé que les recherches qui avait été faites jusqu'en 1974 montraient l'importance des fenêtres, mais qu'elles n'étaient pas concluantes. Selon B. COLLINS, les partisans des fenêtres manquent encore de données comportementalistes à l'appui de leur conviction et argumentent sur la base de métaphores et de suppositions, alors que leurs arguments devraient s'appuyer sur des statistiques (*Ben cheikh, 2013*).

La génération des écoles des années trente était sous forme de constructions légères, à mauvaise isolation et à surface vitrée importante au-dessus du plan de travail. Ceci a engendré des problèmes sérieux d'éblouissement gênant et de perte de chaleur (*Backer, N. et al., 1993*).

Plus tard, les architectes californiens travaillent à résoudre ces problèmes d'une façon très simple, en basant sur trois principes. Ils orientent les ailes de classes vers le nord, obtenant ainsi une lumière douce, uniforme et se protègent contre la lumière directe qui pourrait pénétrer par le vitrage supérieur du côté sud, à l'aide d'avant-toit ou de brise-soleil (*Ben cheikh, 2007*). Woolner et ses collègues (*2007*) soulignent que la lumière aurait un effet

positif sur la réussite ainsi qu'une corrélation avec le bien être. C'est dire que de mauvaises conditions lumineuses auraient un effet négatif sur le bien-être. Ils remarquent aussi l'impact positif d'autres aspects tels que la couleur et la « beauté » des espaces, lesquels sont intimement déterminés par la lumière (Iturra, 2011).

Le processus de conception d'un espace d'enseignement n'est que rarement affecté par les grandes théories d'architecture ou de design, la conception des écoles en général n'a connu que très peu d'évolutions depuis plus d'un siècle (Ben cheikh, 2007). Ce conservatisme est dû en partie au manque de participation des usagers dans la conception des installations d'enseignement. Par ailleurs, l'implication des étudiants et enseignants dans la conception des lieux d'enseignement a été notée par les architectes comme étant positive (Narboni, 2006).

La variété des espaces d'enseignement selon la catégorie pédagogique (primaire, secondaire, universitaire...) porterait à croire à des besoins différents en matière d'ambiance lumineuse, et même en matière de niveau d'éclairage dans la mesure où la performance visuelle d'un enfant et d'un adulte est différente (Ben cheikh, 2007). L'éclairage des salles de primaires et crèches au-delà de son aspect fonctionnel devrait favoriser l'éveil des esprits juvéniles avec une initiation à la perception de l'environnement visuel. Un espace dédié à la lecture sur tableau ne devrait pas recevoir le même procédé d'éclairage d'un espace dédié au dessin par exemple, et ce, en marge des exigences fonctionnelles des deux espaces (Dirahoui, 2015).

Concernant La réglementation relative à l'éclairage des locaux d'enseignement différent d'un pays à un autre. La majorité des lieux d'enseignement ne prennent en considération que le niveau d'éclairage sur le plan de travail comme critère (Narboni, 2006).

L'évolution des standards mondiaux d'éclairage s'est constamment améliorée à partir des années 50, mais en raison de la crise du pétrole de 1970 cette augmentation a été freinée et, dans certains cas, les standards ont même connu des reculs (Pattini, 2005).

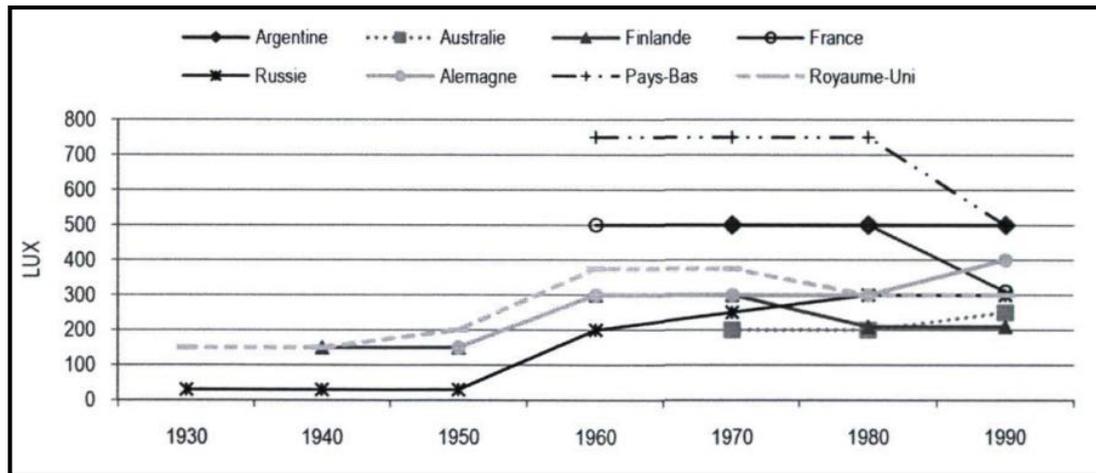


Figure II.32 : Evolution des standards d'éclairage pour les salles de classe (1930-1990). D'après Pattini (2005) (source : Iturra, 2011).

Actuellement, la norme la plus fréquemment utilisée se rapportant, ne serait-ce qu'indirectement à l'éclairage naturel, est la réglementation de la dimension des fenêtres (Boubekri, 2008). Ces normes indiquent généralement un pourcentage minimal de fenêtres par rapport à la surface de chaque espace, ou par rapport au mur. Dans le cas des bâtiments scolaires, les guides et normes incluent aussi des aspects tels que le F U et l'éclairage. Le tableau 1 résume les paramètres exigés et/ou recommandés dans différents pays. Suite à une comparaison entre les niveaux d'éclairage exigés par différentes normes internationales, Pattini (2005) conclut que la moyenne est d'environ 500 lux (Iturra, 2011).

Tableau II.1 : Recommandations et normes de confort visuel dans espaces d'enseignements (Source : Iturra, 2011)

	Chili	Colombie	Argentine	Mexique	Espagne	R-U	CHPS (LEED)	HQE (2010)
Eclairage lux	180lux min	300-400lux atelier d'art	500lux salle de classe 750lux salle d'informatique 1000lux salle de dessin	Maternelle et primaire 150lux	300lux	300lux salle de classe 500lux taches complexes	1pt 20fc (215lux) dans le 50% de la surface 2pt :30fc (323lux)- 50% surface 3pt :40fc (431lux)- 50% surface 4pt 40fc	Éclairage artificiel Primaire et secondaire 300 lux Adultes : 500lux

							(431lux)- 70% surface	
FLJ %	-	2%	2% Salle de classe, 5% Salle de dessin, et 1 % corridors, escaliers	-	-	2%	-	FLJ dans le 80% de la surface Base 1,5% Performante 2% Très-Perf : 2,5%
Uniformité	-	0.6	-	-	-	0,3-0,4 side lit espaces 0,7 top-lit espaces	-	Eclairage artificiel P:0,7 TP : 0,8
Eblouissement (Glare index)	-	-	-	-	-	19 (éclairage artificiel)	Rat> luminances max/moy <15	-
Vue sur extérieur	-	-	-	-	-	-	90% de la surface	100% des salles
% des fenêtres (par rapport au plancher)	14,1 7 et 20% selon la région	Selon le climat 33% (tempéré froid) 25% (Chaud sec) 20% (chaud humide)	Surfaces maximales recommandées: 18% Est Ouest Et 25% Nord Sud	-	-	20% de la surface du mûr intérieur	-	-
Autonomie d'éclairage naturel (DA Daylight Autonomy)	-	-	-	-	-	-	40 à 80% de DA pour le 50 et 75% de la surface	-

Pour l'Algérie, les établissements scolaires trouvent leurs origines bien avant la période coloniale. Malgré cela, les recommandations relatives à la conception des écoles ainsi que la réglementation restent limitées à quelques rapports dimensionnels (Rouag, 2001. Cité par Benharkat, 2006). Elle concerne surtout les établissements du premier et second degré, mais

il n'existe pas une réglementation spécifique aux établissements universitaires (Rouag, 2001. Cité par Benharkat, 2006).

En ce qui concerne les établissements d'enseignement, le guide publié par le Ministère de l'Éducation Nationale sur les constructions scolaires, évoque les caractéristiques géométriques des classes, l'orientation et l'indice de vitrage recommandés. Mais aucune indication n'est donnée sur les exigences de l'éclairage en matière d'éclairage lumineux¹², d'uniformité...etc. Dans ce domaine, la réglementation algérienne est très pauvre par rapport aux réglementations étrangères (Rouag, 2001).

II.1.2. Les salles de classe à l'ère du numérique.

Dans l'Europe apparaît une nouvelle approche de l'école ouverte ou décloisonnées (moins de cloisons, des espaces d'apprentissage très variés), au fur et au mesure les salles de classes dans l'occident vont subir des transformations au niveau spatio-fonctionnel. La salle de classe tend à disparaître, remplacée par des espaces modulables au grés des besoins. La vocation des écoles change aussi. La formation qu'on y dispense ne s'adresse plus aux seuls élèves (Forster, 2004). Cette déclaration confirme que l'évolution de l'espace didactique, à travers le temps, a besoin d'une réflexion synchronique en matière d'ambiance lumineuse.

« Afin de favoriser le processus d'apprentissage dans les établissements d'enseignement, l'éclairage doit être adéquatement relié au type de média d'enseignement utilisé » (ANSI/IESNA). Les tableaux noirs ou blancs, les vidéoprojecteurs, les diapositives, les tableaux interactifs ou les écrans d'ordinateur sont autant de supports avec différentes exigences visuelles. L'utilisation de ces supports dans les salles d'enseignement implique de nouvelles pratiques dans notre façon d'exploiter l'éclairage. Elle modifie également la manière d'apprendre et d'enseigner. La perception visuelle de l'occupant par exemple est concernée, alterner entre une vision éloignée (tableau, projection...) et rapprochée (écran, papier...) demande un effort visuel considérable et, sans un environnement lumineux qui prend en compte ces spécificités, l'éclairage intérieur peut vite devenir inconfortable, voire source de gênes visuelles (Delétré. 2003).

L'écran d'ordinateur reçoit une attention particulière par rapport à d'autres supports ayant intégré l'espace d'enseignement, principalement à cause de ses exigences visuelles foncièrement différentes avec ce qu'il se faisait jusque-là. Alors que la lecture ou le dessin

12 Les grandeurs photométriques de la lumière sont définies en annexe.

sur papier exige un éclairage élevé sur le plan de travail, l'écran en tant que support ne nécessite qu'un faible niveau d'éclairage au risque de causer de l'éblouissement à l'utilisateur (Ostherhaus, Bailey, 1992), toute la problématique consiste alors à fournir un environnement lumineux en adéquation avec les exigences visuelles des deux supports. Dans ce sens, de nouvelles considérations organisationnelles et pédagogiques sont devenues importantes (Higgins et al., 2005). La salle de classe doit fournir un environnement qui s'adapte au processus d'apprentissage et qui l'améliore, qui encourage l'innovation et qui soit un outil d'apprentissage, et non un monument dédié à l'esthétique.

En Algérie la répercussion de la modernisation de l'école était seulement une manœuvre dans l'approche pédagogique et la programmation des études, non sur la pensée de l'espace comme agent favorable et primaire dans la production de la connaissance et la construction des représentations chez l'enfant utilisateur (Marir, 2014).

II.2. La recherche d'une ambiance lumineuse pour les établissements scolaires

Les architectes se limitent généralement à des prescriptions essentiellement fonctionnelles relatives à l'éclairage des locaux. Fontoyne mentionne deux principales perspectives de recherche en éclairage naturel, soit l'identification de nouveaux critères de qualité et l'application de la technologie actuelle (Cantin, 2008).

Veitch (2001) propose aussi d'approfondir le concept de qualité par l'étude de l'interaction entre occupant et environnement. Selon Veitch, la photobiologie¹³ aura très certainement un impact sur les futures recommandations relatives à l'éclairage naturel (Cantin, 2008).

L'approche quantitative bien que nécessaire est fortement réductrice des effets de la lumière, en architecture et n'est pas suffisante, pour valoriser **les aspects qualitatifs** d'un lieu. Il revient donc aux architectes d'imaginer et de projeter **des ambiances lumineuses** qui apporteront une qualité sensible aux espaces tout en satisfaisant les exigences d'éclairage liées aux différents usages de ces espaces. Dans une telle approche, les concepteurs cherchent très tôt à formaliser des intentions d'ambiances lumineuses en s'appuyant largement sur leur expérience et sur celle des autres concepteurs. Ils font pour cela appel à des références et en particulier à des références visuelles (Chaabouni, 2011).

13 Étude scientifique de l'action de la lumière sur les êtres vivants. <http://www.larousse.fr/>

II.2.1. La notion de l'ambiance

« Le terme **ambiance** indique une atmosphère matérielle et morale qui environne un lieu, une personne » (Narbori, 2006). La notion d'ambiance est mise à l'épreuve. Elle est devenue bien présente dans les recherches de l'architecture et de l'urbanisme. Le terme « ambiance » signifie une qualité du milieu (matériel, intellectuel, moral) qui environne et conditionne la vie quotidienne d'une personne » (Demers, 2009). Elle prend en compte l'atmosphère, le climat, le décor, l'entourage, l'environnement, le milieu. Tous ces facteurs font de l'ambiance un concept difficile et compliqué qui forme une globalité réunissant les aspects physiques, sociaux et sensibles. Les ambiances représentent les interactions perçues entre les phénomènes physiques et les formes de l'environnement construit (Siret, 1997).

Dans le domaine de la recherche architecturale, l'ambiance est abordée en tant que phénomène. Augoyard l'exprime en ces termes « *Un ensemble de phénomènes localisés peut exister comme ambiance lorsqu'il répond à quatre conditions :*

- *Les signaux physiques de la situation sont repérables et décomposables ;*
- *Ces signaux interagissent avec d'un côté, la perception, les émotions et l'action des sujets et dans un autre côté, les représentations sociales et culturelles.*
- *Ces phénomènes composent une organisation spatiale construite ;*
- *Le complexe signaux-percepts-représentations est exprimable »* (Chaabouni, 2011).

Dans cette définition, c'est l'interaction des phénomènes physiques avec un environnement spatial vécu par l'occupant de cet espace qui est mise en avant. La relation de l'occupant à l'espace est un élément fondamental de la notion d'ambiance. Dans ce sens, parler de l'ambiance d'un lieu conduit à imaginer un être plongé dans un espace donné, et affecté, en retour, par celui-ci (Chaabouni, 2011).

II.1.2. Ambiance lumineuse :

L'ambiance lumineuse est une des composantes des ambiances architecturales et urbaines, au même titre que l'ambiance sonore ou olfactive. Elle résulte de notre perception de l'éclairage et de l'espace construit, lors de l'usage de cet espace construit. On peut décrire cette ambiance à travers les effets lumineux qui la composent. Le rôle de l'ambiance lumineuse dépend du sens qu'elle donne à l'espace (Tourre, 2007)

Narbori (2006) a développé une définition de l'ambiance lumineuse en la caractérisant comme étant « *le résultat d'une interaction entre une ou des lumières, un individu, un espace,*

et un usage». Cette interaction influence momentanément ou durablement la perception et le ressenti « sensation » de l'espace illuminé.

Quatre éléments interagissent dans une ambiance lumineuse (Belakehal, 2007) :

- 1) **l'environnement lumineux** constituant le stimulus physique fondamental de l'ambiance,
- 2) **l'espace architectural** qui présente le cadre physique et fonctionnel où est vécue cette ambiance,
- 3) **l'utilisateur** qui vit cette ambiance lumineuse.
- 4) **le contexte** général (climat, culture, société...) où se situe l'ambiance lumineuse.

II.2.3. Principaux paramètres de l'ambiance lumineuse :

Les deux principaux paramètres de l'environnement lumineux sont la quantité de lumière et la qualité de la lumière :

La quantité de lumière nécessaire pour effectuer une activité dans de bonnes conditions lumineuses est un aspect assez bien défini aujourd'hui.

La qualité de l'ambiance lumineuse se caractérise par des notions de **confort** et **d'agrément**, paramètres moins bien définis qui demandent une attention particulière. Une ambiance lumineuse est donc fonction de ces trois paramètres (ARENE, 2014), son caractère dépendra de l'attention qui est portée à chacun d'eux. Si un des paramètres est défavorisé par rapport aux autres, l'ambiance lumineuse ne sera pas ou peu satisfaisante et le recours à l'éclairage électrique sera nécessaire, ce qui entraînera une architecture moins durable.

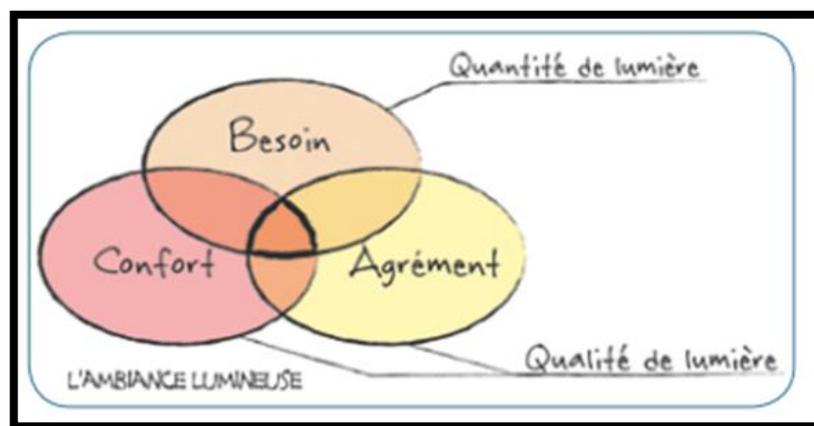


Figure II.33 Représentation schématique de l'ambiance lumineuse (source : ARENE, 2014)

« Une ambiance lumineuse vue comme le résultat d'une interaction entre un individu, un usage connu ou supposé et une lumière naturelle et un espace qui sont représentés. On parle donc d'une ambiance lumineuse « représentée » lorsque les interactions suivantes sont réunies et visibles :

- *Lumière naturelle / Usage* : concerne la qualité et la quantité de la lumière.
- *Lumière naturelle / Espace* : concerne les effets de la lumière.
- *Espace / Usage* : concerne les dispositifs lumineux ; les configurations formelles et spatiales. » (Chaabouni, 2011)

L'ambiance lumineuse se base sur cinq domaines : **quantité de lumière**, **espace** (caractéristiques des surfaces intérieures), **usage**, **effet de lumière**, **dispositifs lumineux** (Narbori, 2006, Chaabouni, Bignon et Halin, 2008).

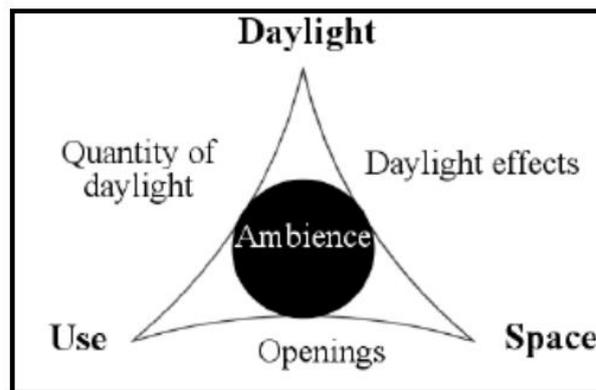


Figure II.34: L'ambiance de la lumière du jour.
(Source: Narbori, 2006)

II.2.4. Rôle de l'ambiance lumineuse

La lumière comprend un grand nombre d'informations, qui donne du sens et de la mesure à l'espace architectural. L'ambiance lumineuse est donc un révélateur de l'architecture, au sens matériel et symbolique (Millet, 1996. Cité par Tourre, 2007). On distingue les notions de lumière par le latin *lux*, la lumière spirituelle qui s'approche de l'illumination, de la clairvoyance ou de l'émotion, et la lumière physique qui est parfaitement rationnelle (Fontoynt, 1998. Cité par Tourre, 2007).

II.2.5. Types d'ambiances lumineuses :

On peut distinguer trois catégories fondamentales d'ambiances lumineuses (Gallas, 2008):

- **la pénombre**: comme étant un dialogue entre l'ombre et une lumière solide qui la transperce par endroits.
- **L'ambiance lumineuse** qui se caractérise par une clarté ambiante, une omniprésence d'une lumière qui tend à disparaître parce qu'elle est partout.

- **L'ambiance inondée** se caractérise par une exaltation de la lumière embrassant tout l'espace ; il se trouve qu'il y a trop plein d'une lumière envahissante et parfois écrasante.

Ainsi, il devient possible de définir **une ambiance dynamique**, une ambiance calme et feutrée, une ambiance qui pourrait être triste (sans le vouloir), monotone, etc Toutefois, chacun de ces types d'ambiances recouvre une grande variété de manières d'admettre la lumière et une multitude de qualités de lumières. Et comme toute ambiance physique, il faut considérer l'ambiance lumineuse sous **deux approches**. **La première est une approche spatiale** par le fait d'établir des variations lors de déplacements, en réalisant une carte d'ambiance sur tout l'espace à étudier. **La deuxième est une approche temporelle** en s'assurant de la reproductibilité des mesures, à condition de prendre compte des conséquences qui peuvent être générées par les cycles journaliers ou saisonniers (Chaabouni et al, 2008).

Nous allons essayer de regrouper des différentes classes d'ambiances¹⁴ selon les travaux (Chaabouni, 2011), (Gallas, 2009) et (Cervantès, 2012). Afin d'en représenter un plus grand nombre.

II.2.5.1. La lumière uniforme :



La lumière uniforme est due à un éclairage diffus ou indirect, à un éclairage provenant du Nord. Elle est obtenue grâce à de grandes surfaces vitrées avec un vitrage transparent et une orientation plutôt Nord ou grâce à des parois translucides. C'est « *une lumière qui ne se voit pas car elle est partout* » (Ciriani, 1991. Cité par Cervantès, 2012). L'objectif d'un tel éclairage est « *de faire croire que le dedans est encore le dehors, de reproduire in vitro les conditions de l'extérieur.* » (Ciriani, 1991). Un éclairage indirect et diffus uniformise la répartition de la lumière. L'indice d'ouvertures de ces espaces est assez important, 1/2, 1/3, voire plus. La lumière uniforme fait référence à la lumière des ateliers d'artistes ayant de grandes ouvertures orientées au Nord et générant une lumière neutre sans direction, sans ombre, sans contraste et de couleur blanche (Gallas, 2013).

II.2.5.2. La lumière rasante :

¹⁴ Les classes ou les sous-classes sont imaginées à partir des définitions et tendent à rester neutres par rapport aux dispositifs d'entrée de la lumière.



C'est une lumière directe produite par des rayons incidents du soleil relativement bas (plus horizontaux que verticaux). La lumière rasante crée un **faible contraste**. Les tâches solaires sont très présentes et révèlent les détails structurels du bâtiment et notamment des ouvertures multiples de tailles moyennes et orientées au sud. Il peut générer une ombre très franche dont les limites sont précises (Gallas, 2013).

Pour Lassance, l'effet de lumière rasante provient « *d'un éclairage tangent à une surface dont il révèle les textures* », il génère un éclairage ciblé de **très forte intensité** (Lassance, 1998. Cité par Cervantès, 2012) « *La lumière rasante à directivité horizontale est due à la présence d'une source puissante à l'horizon (le soleil) par rapport à un faible éclairement général de la scène et des objets qu'elle contient* » (Lassance, 1998. Cité par Cervantès, 2012) et la représentation des ombres longues sont appelées selon Lassance effet de lever ou de coucher du soleil.

II.2.5.3 La lumière englobante



La lumière de type englobante crée une lumière directe de très forte incidence qui irradie la totalité de l'espace architectural. Le mode de propagation et de répartition de la lumière englobante est le même que celui de la lumière uniforme.

La seule différence entre ces deux types d'effets est au niveau de l'**intensité** du rayonnement lumineux qui est largement supérieure pour la lumière englobante. Cet effet crée un trop plein de lumière et une clarté qui ressemble à celle de l'éclairage extérieur supprimant ainsi les limites et dressant une continuité entre les conditions d'éclairage de l'environnement extérieur vers l'espace intérieur (Gallas, 2013).

Les notions de contraste et d'ombre sont absentes donnant l'impression que la lumière naturelle entoure l'ensemble de l'espace. L'effet de lumière englobante rappelle la lumière produite dans les serres ou dans les espaces possédant de grandes surfaces vitrées horizontales (Gallas, 2013).

II.2.5.4 L'ambiance inondée :



C'est une lumière émergente, « lumière radieuse » qui illumine abondamment un espace. Elle constitue une variante de la « lumière - éclairage » car il y a un trop plein de lumière et de clarté. La lumière est ressentie comme étant plus présente à l'intérieur qu'à l'extérieur, « elle fait perdre à l'extérieur de sa force. En ce sens, elle a une visée émouvante. L'intérieur s'avance vers l'extérieur, irradie comme un soleil » (Ciriani, 1991. Cité par Cervantès, 2012). Auguste Laugel définit la lumière écrasante comme étant « cette lumière qui rapproche tous les tons et ne laisse plus voir qu'à travers une sorte de poussière frémissante » (Laugel, 1869. Cité par Cervantès, 2012). Les rayons lumineux sont presque perceptibles et une sensation de flou peut être ressentie dans ces espaces. Les objets et les différentes parois sont éclairés avec une même intensité et une même couleur de lumière. « La grande lumière a pour effets de rapprocher, de noyer tous les tons et d'y faire prédominer le jaune » (Laugel, 1869. Cité par Cervantès, 2012). Daphné Le Sergent écrit que la lumière écrasante, « dans un éclair d'éblouissement aplanit le monde visible » (Sergent, 2009. Cité par Cervantès, 2012). C'est un éclairage agressif, surexposé. L'emploi de la couleur blanche pour les revêtements intérieurs est fréquent lorsque l'on est en présence d'une ambiance inondée.

Le facteur de lumière du jour de ces espaces est de 8% à plus de 12% ce qui donne aux observateurs une impression de grande clarté. L'espace s'ouvre vers l'extérieur. L'éclairement de ces espaces est de 1500 à plus de 2000 lux.

II.2.5.5 La lumière colorée :

Colorée par réflexion :

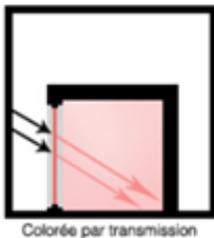


Le phénomène de réflexion de la lumière : des rayons lumineux qui frappent une surface réfléchissante sont en partie renvoyés selon un angle égal à celui de leur direction d'arrivée. Cependant, comme aucune surface n'est totalement réfléchissante, elle « diffuse dans toutes les directions la lumière incidente qu'elle reçoit, se comporte comme une source secondaire de lumière » Lurçat (1953). Le matériau, en reflétant la structure, donne sa couleur à la lumière. La lumière transforme la matière. Pour que la lumière soit réfléchie, il faut que la surface sur laquelle arrivent les rayons incidents soit opaque afin de s'opposer au passage des rayons lumineux (Cervantès, 2012).

Une surface opaque recevant des rayons lumineux, provoque dans toutes les directions une émission de reflets, dont la coloration sera directement fonction de celle de la surface éclairée.

Une surface brillante ou polie, ne renvoie des rayons lumineux que dans une seule direction et ne leur donne aucune coloration ; sa propre couleur agira sur la qualité et sur l'intensité de la lumière réfléchi. « *Certaines couleurs, en effet, de part leur clarté et leur intensité rayonnent, c'est à dire qu'elles semblent projeter hors de la surface qu'elles recouvrent des rayons lumineux qui, par cette couleur apparente, réagissent sur la qualité des couleurs avoisinantes et les transforment légèrement dans leur tonalité et dans leur caractère* » Lurçat (1953). Les parois voisines d'une paroi colorée recevant de la lumière sont, en fonction de leur revêtement, plus ou moins teintées par les rayons provenant de la paroi colorée. Leur couleur paraît ainsi différente de leur couleur d'origine, teintée par la couleur du mur coloré (Cervantès, 2012).

Colorée par transmission :

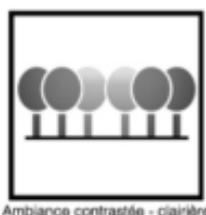


Les rayons lumineux se colorent lorsqu'ils sont transmis à travers une paroi translucide ou transparente colorée. Les rayons lumineux colorés modifient la perception et l'ambiance générale de l'espace (Cervantès, 2012).

II.2.5.6. La lumière contrastée :

C'est une lumière directe qui produit des zones avec un **fort écart d'éclairement** créant une lecture hiérarchique de l'espace (Gallas, 2011). Les tâches solaires créées font apparaître différents motifs.

II.2.5.6.1. Contrastée Clairière :



L'effet clairière se remarque lorsqu'un petit bout d'espace très éclairé naturellement est entouré de zones sombres de toute part. L'effet clairière peut servir à mettre en valeur un espace ou un objet et à donner une ambiance particulière à un lieu. C'est pourquoi deux sous catégories peuvent être créées.

II.2.5.6.1.1. Focalisée sur un élément



Focalisée sur un élément

L'éclairage est direct et les rayons lumineux sont dirigés vers un objet ou un point focal particulier soit à toute heure de la journée, soit à un moment précis. Le regard est dirigé et attiré par la lumière. L'ambiance générale est plutôt sombre.

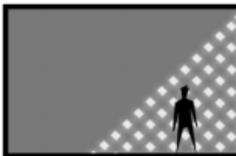
II.2.5.6.1.2. Lumière émotion



Lumière émotion

L'objectif de la lumière – émotion est de capter l'attention pour produire une concentration, une émotion. « *Une des conditions importantes de cette lumière est qu'elle se manifeste d'autant plus qu'elle exclut l'extérieur* » (Ciriani, 1991). Les ouvertures sont relativement restreintes et souvent zénithales, elles n'ont pas été créées pour permettre la vision de l'extérieur mais pour donner une ambiance particulière à un lieu. Un « *éclairage « descendant » nous prive de contexte et suggère la concentration, le recueillement et quand il invite le regard c'est pour lever les yeux vers le ciel, la voûte céleste...* » (Savic, 2011). Les rayons du soleil entrent dans la pièce de manière directe ou indirecte en fonction du dispositif mis en œuvre mais une atmosphère de pénombre règne dans ce type d'espace. L'extérieur est tout de même présent par les variations de la luminosité et des taches solaires qui se déplacent au fil de la journée.

II.2.5.6.2. Contrastée tâches solaires :



Les zones éclairées sont de tailles assez restreintes et créent des motifs dans les zones d'ombre. Les tâches solaires ainsi créées dans l'ombre peuvent avoir des contours nets, bien délimités ou au contraire diffus. C'est pourquoi cette sous-classe peut être composée de deux nouvelles catégories qui sont : tâches solaire contours nets ou tâches solaire contours diffus.

II.2.5.6.2.1. Contours nets :



Contour des tâches nets

Les tâches solaires aux contours nets sont dues à une lumière directe et à des parois d'incidence plutôt mates. Sous un éclairage direct, ciel dégagé, les parois sont fortement éclairées. Les percements dans les parois, composés d'un vitrage transparent qui dévie peu la trajectoire des rayons incidents, laissent passer les rayons du soleil de manière directe à l'intérieur de l'édifice. « Les reliefs, quels qu'ils

soient, apparaissent dans toute leur précision de forme ou de dessin. » (Lurçat, 1953. cité par Cervantès, 2012). De forts contrastes apparaissent dans les zones éclairées. Plus l'intensité des zones éclairées est forte, plus les zones d'ombres apparaissent sombres. Le contraste est donc plus important. « Les effets produits par cette sorte d'éclairage, se traduisent par la juxtaposition, d'une part d'éléments bien définis dans leurs détails et vigoureusement modelés, de l'autre, d'éléments présentant des zones ombrées bien soulignées et précisées dans leur contour. » (Lurçat, 1953)

II.2.5.6.2.2. Contours diffus :



Contour des tâches diffus

Les tâches solaires aux contours diffus sont dues à une lumière diffuse ou indirecte vive, à une surface d'incidence brillante, à un vitrage diffusant à l'intérieur des percements. Le contour des tâches n'est pas net, la lumière s'estompe progressivement sur les bords de la tâche. Par ciel couvert, nuageux et avec une lumière uniforme, « tout le jeu des contrastes de lumière et d'ombre, la lecture des reliefs et des formes, autrement rendue facile par la franche opposition des sombres et des clairs, disparaissent en partie, s'amortissent dans l'estompement général des lignes et des volumes. » (Lurçat, 1953)

II.2.5.6.3 Contrastée fond de pièce :



Elle divise l'intérieur de l'espace en deux zones complètement distinctes. Cet effet de lumière est créé par un phénomène de diffusion de la lumière naturelle à l'intérieur de la pièce. L'éclairage coté façade est important et s'estompe en fond de pièce. Les rayons lumineux incidents sont réfléchis par les parois (sol, mur) et éclairent ainsi légèrement le fond de la pièce (Cervantès, 2012).

II.2.6. Langage de qualification d'une ambiance lumineuse

L'ambiance lumineuse dans l'espace architectural fait l'objet de plusieurs recherches qui expriment ses résultats sous trois catégories, comme suit :

1 er catégorie : chiffrée Se rapporte aux valeurs sous forme d'indices calculés à base d'instruments de mesures et méthodes de calculs. Tels que, **le facteur de lumière du jour** **contraste entre luminance, indice d'éblouissement**. (Belakehal, 2007).

2^{ème} catégorie : conformationnelle D'après Belakehal, cette catégorie regroupe les schémas et les modèles de distribution des rayons lumineux à l'intérieur de l'espace architectural, plus certains indices en relation avec des éléments de la conformation architecturale influençant l'ambiance lumineuse. Par exemple le rapport de la surface vitrée/surface du sol. A propos des modèles de propagation, ils se rapportent soit au type du dispositif d'éclairage (latéral, zénithal), soit aux dispositions morphologiques ; position des fenêtres dans les murs, ou l'une par rapport à l'autre, ...etc. comme ils se rapportent à la topologie, telles que ; proximité, éloignement, ...etc. Les schémas suivant englobent l'ensemble des indicateurs de chaque modèle :

Indicateurs typologiques : Le type d'éclairage se définit par rapport à la position de l'ouverture sur les différentes parois de la conformation. Le premier type qui est l'éclairage latéral relativement à la position d'ouverture sur les parois verticales. Cependant l'éclairage zénithal qui constitue le deuxième caractérise le flux lumineux issu des ouvertures positionnées sur la couverture ou le toit de l'édifice.

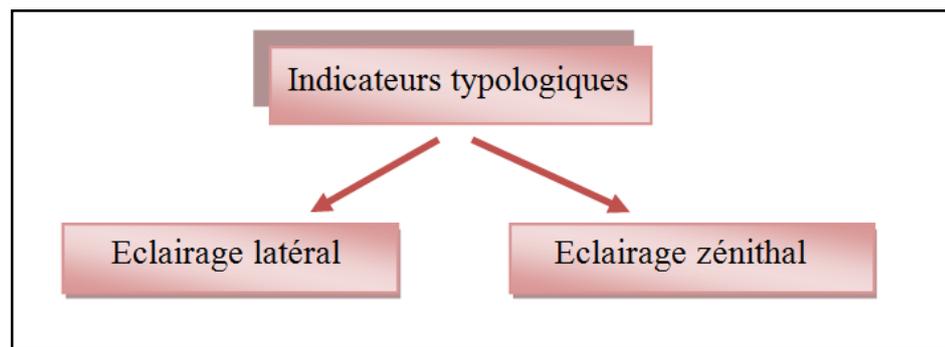


Figure II.35 Indicateurs Typologiques d'Eclairage Naturel (Source : Belakehal, 2007)

Indicateurs topologiques : Quant aux indicateurs topologiques, ils sont relatifs au comportement de la lumière à l'intérieur de l'espace, qui peut être sous forme de polarisation géométrique (centre, axe, périphérie) ou polarisation non géométrique (zone, région) pour des raisons symboliques, fonctionnelles, ...etc. (Belakehal, 2007)

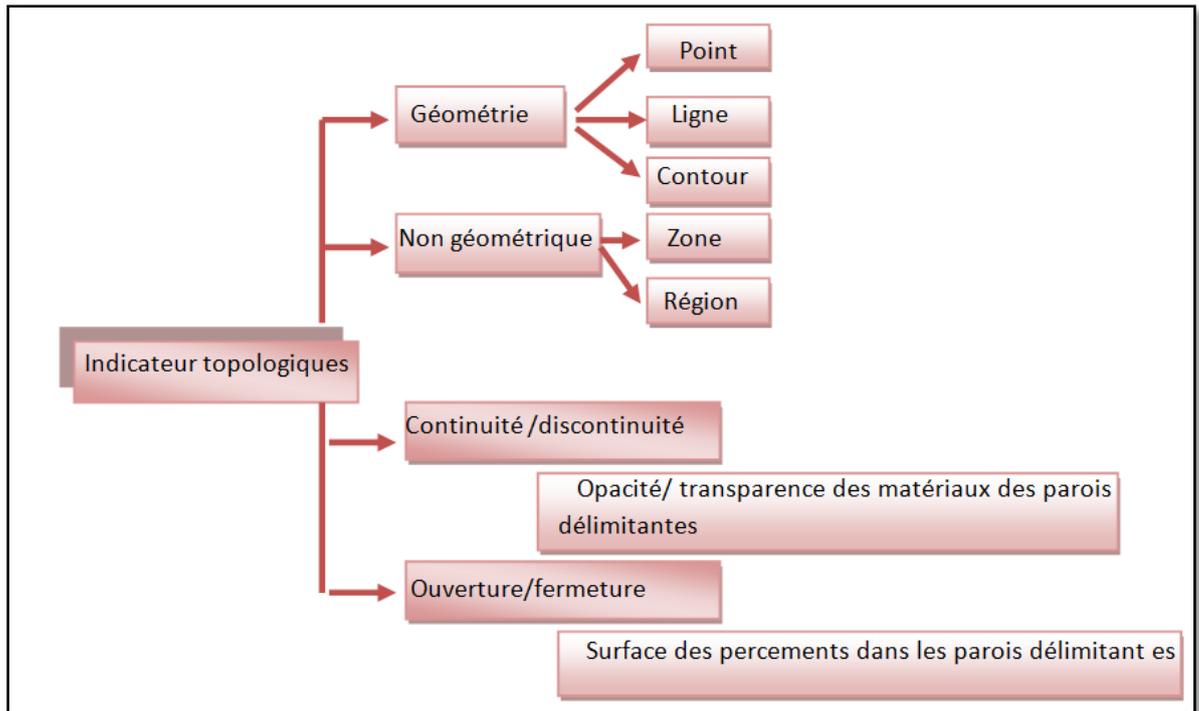


Figure II. 36 : Indicateurs topologiques d’Eclairage Naturel. (Source : Belakehal, 2007)

Indicateurs morphologiques : Les indicateurs morphologiques identifient la manière avec laquelle s’organise les ouvertures à travers la forme architecturale ; c-à-d leurs syntaxe. Donc il s’agit de deux rapports, le premier est le rapport des ouvertures à la forme et les ouvertures. Le deuxième entre les ouvertures

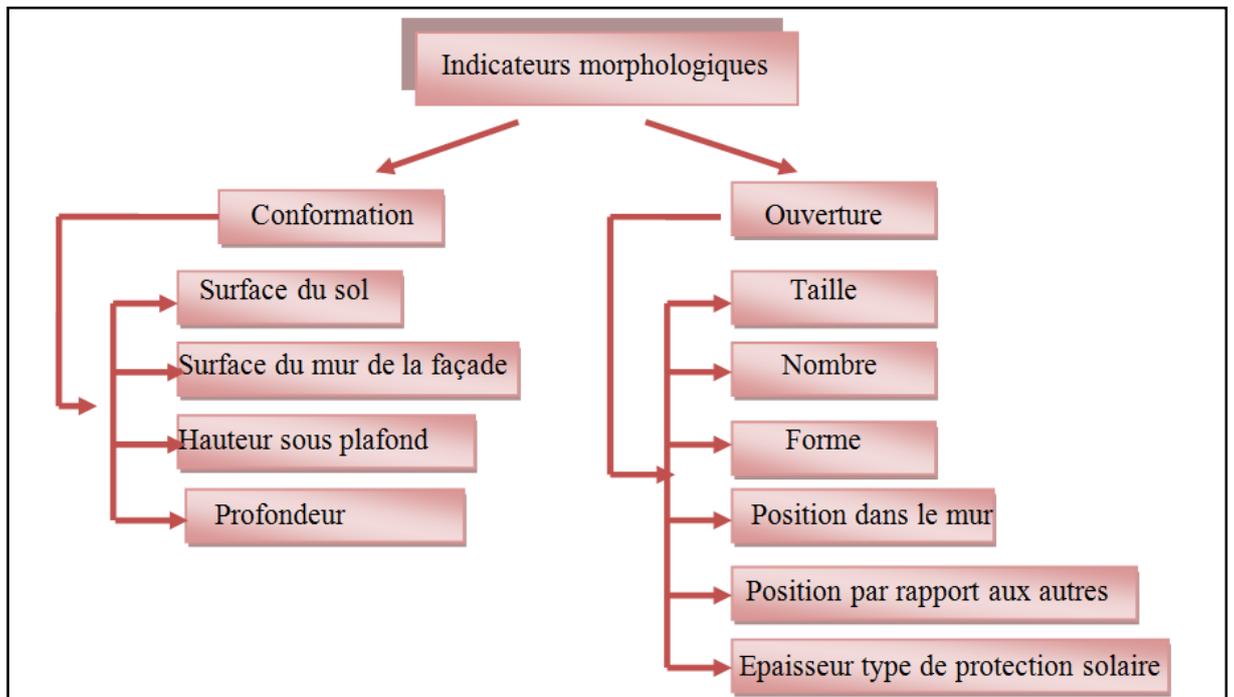


Figure II.37 : Indicateurs Morphologiques d’Eclairage Naturel. (Source : Belakehal, 2007)

3^{ème} catégorie : discursive sa base est le discours des architectes. Elle constitue les aspects qualitatifs qui sont d'une nature subjective. Se représentent à travers les aspects plastiques, perceptuels et techniques des représentations ...etc.

II.3. La qualité lumineuse et ses paramètres à caractériser

La qualité d'un éclairage peut être appréciée au regard de différents critères liés soit à **l'agrément visuel**, soit au **confort visuel** engendrés pour un observateur. Parmi les paramètres qui concourent à cet état de confort, la présence de phénomènes d'éblouissement d'inconfort et leur ampleur apparaissent déterminantes. Ces phénomènes peuvent être mis en évidence grâce au calcul d'indices de confort visuel spécifiquement élaborés. Il existe ainsi de nombreuses formulations basées sur des données mesurables de l'environnement lumineux et destinées à la prévision de l'éblouissement d'inconfort (Cantin, 2008).

Plusieurs articles ont découlé de cette étude, Veitch & Newsham (1995, Cité par Dubois M-C, 2001) définissent la qualité lumineuse comme étant « *le succès ou l'échec du système d'éclairage à répondre aux besoins des usagers* », et que la qualité lumineuse existe quand le système d'éclairage :

- Crée de bonnes conditions de vision
- Assiste à la bonne exécution des tâches
- Permet une bonne interaction et communication
- Apporter de bonnes conditions de santé et de sécurité
- Contribue à une bonne appréciation esthétique de l'espace

Par conséquent, la qualité lumineuse n'est pas mesurable directement dans la mesure où elle est considérée comme étant un état émergent créé par l'interaction de l'individu avec son environnement lumineux. Ainsi, la qualité lumineuse ne peut être évaluée que par la voie de mesures comportementales (Veitch & Newsham, 1995, Cité par Veitch, 2001). Pour Tourre (2007), la qualité lumineuse est une propriété subjective de la lumière, tout comme le confort visuel ou les impressions dues à l'ambiance lumineuse, ces propriétés relatives à la perception dépendent de la culture, de l'expérience et de l'état d'esprit de l'occupant (Cantin, 2008).

Dans ce sens, Veitch (2001) a proposé un modèle intégré de la qualité lumineuse. Les besoins humains en matière d'éclairage sont reliés à l'environnement où évolue l'individu,

ce modèle considère la réponse de l'occupant à son environnement lumineux comme étant contextuelle, elle varie selon les caractéristiques de l'occupant, de son vécu et de sa culture, mais aussi selon des paramètres qui régissent son environnement physiques comme le démontre le schéma dans la figure ci-dessous.

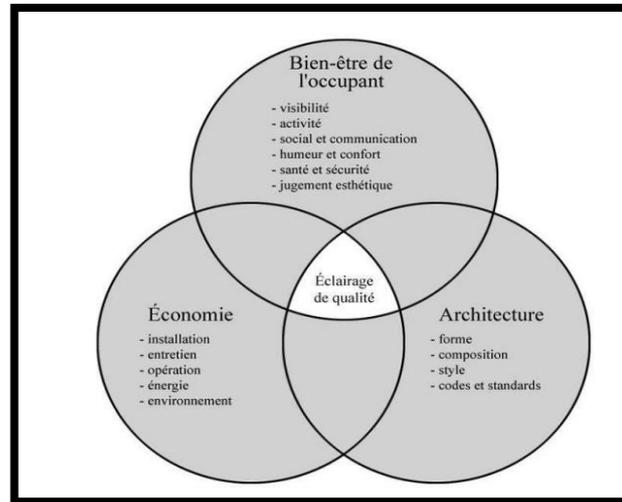


Figure II.38: Modèle intégré de la qualité lumineuse (source : Cantin, 2008)

A contrario, le comité IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) via une démarche rationaliste, a tenté d'identifier plusieurs facteurs qui contribuent vers une qualité lumineuse (Miller, 1994, Cité par Dubois, 2001) :

- Luminance des surfaces de la pièce
- Éclairage et contraste
- Source de luminance (éblouissement)
- Rendu des couleurs
- Visibilité de la lumière
- Clarté spatiale et visuelle
- Orientation psychologique
- Contrôle de l'occupant

Cette approche englobe des paramètres physiques et psychiques, mais elle ne constitue toujours pas une méthode tangible (Miller, 1994. Cité par Dubois M-C, 2001 b). Qu'elles soient basées sur des critères subjectifs ou physiques, ces approches soulignent l'importance de l'exécution de la tâche dans de bonnes conditions. (Cantin, 2008)

L'analyse de la qualité lumineuse d'un point de vue « usages » s'en remet généralement à la distribution de la lumière (Chaabouni, 2011), exprimée en valeurs photométriques comme la répartition de l'éclairement, où par des appréciations subjectives comme une distribution contrastée.

L'usage de l'espace est donc un critère déterminant dans l'appréciation de la qualité visuelle, un espace voué au travail sur ordinateur par exemple ne doit pas engendrer de l'éblouissement à l'utilisateur, mais ce même espace peut se révéler non fonctionnel pour un usage de lecture où les exigences visuelles sont différentes (Cantin, 2008)

La qualité lumineuse est tributaire donc de plusieurs facteurs qui revêtent à cette notion toute sa complexité, cet ensemble de stimuli lumineux influe sur la perception de l'individu de son environnement lumineux.

II.3.1. Le confort visuel

La définition usuelle du confort se limite à la satisfaction des besoins propres à chaque composante du système sensoriel. Dans le cas précis de la lumière, le confort visuel est défini comme étant : « une impression subjective de satisfaction du système visuel principalement procurée par l'absence de gêne induite par l'ensemble de l'environnement visuel » (Dubois, 2006). Le confort considère comme une interaction entre l'individu et l'espace qui l'entoure, c'est-à-dire, entre des conditions ambiantes physiquement mesurables et certaines conditions individuelles qui affectent notre perception. Selon Hegger et al. (2008)

Le bien-être d'une personne est basé sur sa perception subjective des influences externes. Par conséquent, le confort n'est pas un facteur qui peut être évalué quantitativement avec précision, mais représente des valeurs empiriques individuelles pour lesquelles un être humain percevra son environnement comme étant agréable (Iturra, 2011).

Un éclairage mal conçu peut vite devenir source de pollution lumineuse, un terme qui peut désigner une présence nocturne anormale de la lumière gênante pour les écosystèmes, mais surtout dans notre contexte elle inclue l'éblouissement lumineux, un sur éclairement, un éclairage sans rapport avec la tâche au travail et l'éclairage superflu synonyme de gaspillage d'énergie (Narboni, 2006). La grande majorité des programmes d'éclairage se doit d'atteindre un seuil bien précis d'éclairement (Narboni, 2006), un butoir fixé par des normes

ingénieusement calculées de manière à obtenir des niveaux d'éclairage suffisants au sol ou sur des plans utiles. Mais cette méthode simpliste néglige complètement la perception visuelle des surfaces éclairées qui est plus apte à qualifier un espace.

Avec l'avènement de nouvelles pratiques telles que le travail sur écran, cette approche quantitative devient clairement obsolète et incomplète, du moment qu'elle dénigre une composante de plus en plus importante qu'est la qualité de la lumière (Iturra, 2011) qui influe grandement sur le confort visuel. En plus de la perception humaine de la qualité lumineuse, Boyce (2004) remarque que l'éclairage naturel des bâtiments ne doit pas être considéré uniquement en fonction des effets sur les capacités visuelles, dès lors qu'il a des effets sur les autres systèmes non visuels et notamment le système biologique.

Le confort visuel demeure donc une grande préoccupation de la majorité des systèmes d'évaluation environnementale, l'usage privilégié de la lumière naturelle est conseillé en raison de relations établies entre cette dernière et la santé des occupants (Boyce, 2004). Le confort visuel n'est pas une finalité abstraite qu'on pourrait atteindre avec des recommandations rigoureuses comme les normes d'éclairage lumineux, mais plus la combinaison subtile de plusieurs conditions variables à satisfaire pour que l'occupant perçoive un confort visuel.

Il existe différents paramètres pour mesurer le confort visuel. Une première classification peut être basée sur son caractère statique ou dynamique. Les paramètres statiques correspondent aux indicateurs calculés aux conditions spécifiques, dont l'évaluation est indépendante du temps. Alors que les indicateurs dynamiques ou basés sur le climat correspondent à des mesures qui reflètent la variation temporelle des conditions d'éclairage naturel, en raison de la météo, des saisons, de l'orientation spatiale, etc. (Iturra, 2011).

II.3.1.1. Paramètres du confort visuel

II.3.1.1. Paramètres statiques

II.3.1.1.1. Éclairage

L'éclairage correspond à un flux lumineux reçu par unité de surface. Son unité de mesure est le lux (Ix) et correspond à un flux lumineux de 1 lumen (Im) couvrant uniformément une surface de 1 m². L'instrument permettant sa mesure est le luxmètre. Ce paramètre peut-être utilisé pour décrire la quantité minimale de lumière requise pour une tâche visuelle

spécifique et pour mesurer l'uniformité de la distribution de la lumière (Brandi et al, 2006).

Il est relatif à certains facteurs qui peuvent l'influencer tels que ;

- la grandeur de l'angle solide¹⁵ dans lequel le point voit le ciel.
- La situation géographique et climatique de la scène.
- L'état de nébulosité du ciel.
- La présence ou non de l'astre solaire à travers une fenêtre visible depuis le point" (Pascal. J; 2003).

En ce qui concerne les besoins d'éclairage, ils varient selon l'âge de la personne et le type d'activité à effectuer. Par exemple, une personne de moins de 35 ans a besoin de 20% moins d'éclairage par rapport à une personne de 35 à 55 ans, et 33% moins par rapport à une personne de 55 ans (Serra et Coch, 2005). Pour les activités à l'extérieur, la plupart des gens se sentent à l'aise avec des niveaux supérieurs à 2000 lux, tandis qu'à l'intérieur, des études montrent que les luminaires sont allumés lorsque le niveau baisse en dessous de 75 lux (Brandi et al., 2006). Cette valeur correspond à la limite à laquelle la perception des couleurs commence à être affectée (Brandi et al., 2006).

Tableau II.2 . Facteurs modificateurs des valeurs générales d'éclairage. D'après Serra et Coch (2005).

	Facteur
Age < 35, activité peu importe et facile	0.8
Age 35 à 55, activité importante, difficulté régulière	1
Age > 55, activité critique et peu usuelle, haute difficulté	1.2

Les recommandations et normes prévoient des valeurs plus élevées selon le type d'activité à développer. Par exemple, pour les salles de classe les valeurs recommandées varient d'entre 300 à 500 lux.

II.3.1.1.2. Uniformité

Ce paramètre statique correspond au ratio entre la valeur minimale et la valeur moyenne d'éclairage. Il fournit un indicateur de la distribution de la lumière du jour dans une pièce. Sa valeur va de 0 jusqu'à 1, où 1 représente une distribution optimale et homogène

¹⁵ Les grandeurs photométriques de la lumière sont définies en annexe

de la lumière. Certaines normes suggèrent des valeurs minimales entre 0,3 et 0,7, selon le type d'éclairage naturel (Iturra, 2011).

II.4.1.1.3. Facteur lumière jour (FLJ)

Le facteur de lumière du jour est défini comme le rapport existant entre l'éclairement intérieur dans un point d'un bâtiment, et l'éclairement horizontal extérieur sous une condition de ciel couvert-CIE (Moon and Spencer 1942, cité par Reinhart et al., 2006). Il s'exprime en pourcentage et il permet une mesure de la quantité et de la qualité de la lumière présente dans un espace en montrant l'efficacité d'une pièce et de sa fenêtre en tant que système d'éclairage naturel, en donnant une bonne indication de l'environnement lumineux intérieur tel que perçu par l'œil humain et en décrivant la relation entre les espaces intérieurs et extérieurs tout en indiquant le contraste entre les deux (plus le FLJ est faible, plus le contraste est élevé). Il existe des formules pour estimer le Facteur de Lumière du Jour moyen d'un local ; ces valeurs du FLJ sont indépendantes de la saison, de l'heure et de l'orientation des baies vitrées.

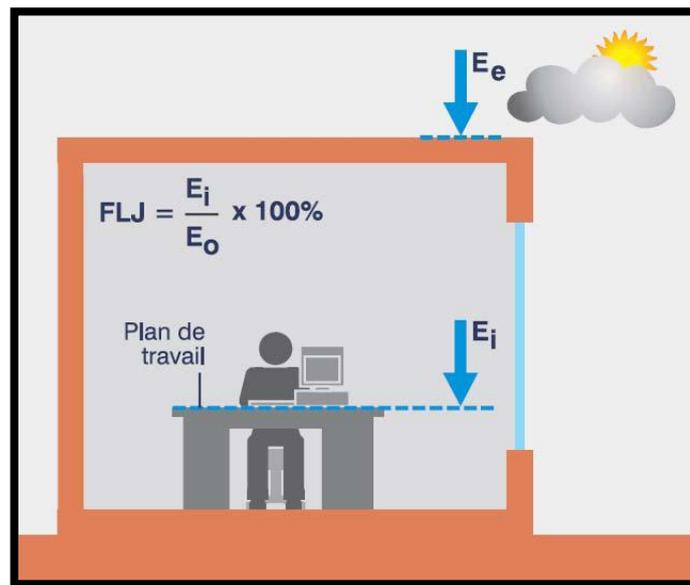


Figure II.39 Facteur de lumière de jour (source : vizea.fr/wiki-lesenr/construction-wiki/outils-construction/flj.html).

Tableau II.3 : Relations entre facteurs de jour et impressions visuelle (source : Iturra, 2011).

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 environ 3 à 4 fois la hauteur de la fenêtre)			A proximité des fenêtres ou sous des lanterneaux		
Impression de clarté	Sombre à peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local	Cette zone semble être séparée de cette zone					
Ambiance	Le local semble être refermé sur lui-même			Le local s'ouvre vers l'extérieur		

II.3.1.1.4. Eblouissement

L'éblouissement est l'un des soucis actuels majeurs liés à l'éclairage (Nazzal, 2001. Cité par Cantin, 2008), il représente une gêne occasionnée par une présence de lumière directe ou incidente dans le champ de vision, il est ainsi provoqué par un contraste excessif des luminances dans le champ visuel (Serra et Coch, 2005. Cité par Iturra, 2011). On peut considérer que l'éblouissement est une forme de bruit visuel, comme le bruit est associé à un éblouissement acoustique (Brandi, 2006. Cité par Iturra, 2011).

L'éblouissement devient le problème contemporain majeur quand l'utilisation des écrans s'est démocratisée, Le travail prolongé sur écran peut engendrer des troubles liés à la santé (Cail, 1992), il est défini suivant de aux catégories¹⁶ (Ostherhaus, Bailey, 1992) : « - **Éblouissement perturbateur** (éblouissement physiologique) : effet de voile causé par la dispersion de la lumière au sein de l'œil. La visibilité et la performance visuelle sont affectées.

- **Éblouissement d'inconfort** (éblouissement psychologique) : sensation de distraction ou de douleur causée par des sources lumineuses intenses et/ou réparties non uniformément dans le champ de vision. L'œil est sollicité alors que la tâche à effectuer requiert une concentration visuelle. Contrairement à l'éblouissement perturbateur, il n'y a pas de perte

¹⁶ Selon Moore (1985), et selon les sources qui le provoquent, l'éblouissement qui soit inconfortable ou perturbateur est peut être catégorisé en deux types direct ou réfléchi. Cette classification **direct** / **indirect** s'utilise également dans bien des cas pour distinguer les éblouissements produits directement par une source située dans le champ visuel de ceux qui proviennent d'une réflexion sur une surface brillante en reflétant l'image en l' i mage de la source lumineuse (par exemple une table revêtu d'une surface vitrée)

de visibilité. L'éblouissement d'inconfort se traduit plutôt par une fatigue visuelle parfois accompagnée de maux de tête. ».

Le degré d'éblouissement dépend des facteurs suivants : (Hopkinson, Petherbridge & Longmore, 1966. Cité par Abdelatia, 2013)

- Le niveau de luminance auquel l'œil s'est adapté (luminance de l'arrière-plan)
- Le niveau de luminance de la source d'éblouissement ;
- L'association des deux et le degré de contraste engendré ;
- La position de la source d'éblouissement par rapport à la ligne de visée de l'observateur.

D'autres paramètres d'ordre visuel et esthétique entrent en jeu pour le niveau d'éblouissement, comme la nature et la qualité des différentes surfaces (matériaux, brillance, couleur, réflexion...) (Berman et al., 1996. Cité par Dubois, 2001).

Évaluer l'éblouissement

L'évaluation de l'éblouissement devient capitale pour sonder la satisfaction des occupants, d'autant plus qu'avec l'avènement de l'ordinateur il représente une source importante d'inconfort. Malgré cela nous ne disposons toujours pas d'indicateurs capables de quantifier de façon précise le degré d'éblouissement (Marty et al., 2003), car ces indicateurs ont tendance à surévaluer l'impact du phénomène (Velds, 2002 .Cité par Dirahoui, 2015).

Il peut être exprimé de manière générale par l'équation :

Équation II.1 la sensation d'eblouissement (Source: Bonte, 2014).

$$SE = \frac{L_s^a \times \omega_s^b}{L_b^c \times P^d}$$

Avec :

- SE la sensation d'éblouissement,
- a, b, c, d des coefficients de pondération,
- L_s (cd.m²) la luminance de la source d'éblouissement,
- ω_s (sr) l'angle solide entre la source et l'œil,
- L_b (cd.m²) la luminance de fond,
- P d la position de la source par rapport au centre du champ de vision.

Et Au niveau des guides et recommandations, une première approche pour éviter l'éblouissement correspond aux exigences des ratios de luminances (L_{max}/L_{min}). Par

exemple, Serra et Coch (2005) recommandent une proportion de 1 à 3 entre la tache visuelle et son fond proche, 1 à 5 avec la surface de travail général, et 1 à 10 avec des autres surfaces du champ de vision. Ces valeurs coïncident avec les recommandations des certaines normes concernant aux espaces éducatifs tel que montré dans le tableau.

Tableau II.4 Tableau Ratios de luminances recommandés pour les espaces d'enseignement.
(Source : normes indiquées Iturra, 2011)

Ration de luminance	Argentine IRAM-AADL J 2005	Espagne IDAE- CEI ,2001
Entre les taches et les environs adjacents	3 à 1	3 à 1
Entre les taches et les zones les plus reculées	10 à 1	10 à 1
Parmi les lampes (ou le ciel) et les zones adjacentes	20 à 1	20 à 1
Partout dans l'environnement de travail	40 à 1	40 à 1

Depuis les années 1970 de nombreux indices visant à quantifier l'inconfort dus à l'éblouissement ont été créés. Nous ne dressons ici qu'une liste comportant les plus courants dans la littérature.

Le premier indice notable est le **DGI** (Daylight Glare Probability). Il est formulé par Hopkinson en 1972. Il s'appuie sur des expériences menées en laboratoire en conditions de lumière naturelle. Toutefois, il n'est pas considéré comme fiable pour des lumières directes ou des reflets spéculaires puisque Hopkinson a effectué ses expériences avec un ciel diffus (BONTE, 2014).

Par la suite, différents indices sont apparus, et en 1979, Einhorn propose d'établir un indice prenant en compte les résultats de la littérature pour établir une norme adoptée par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Il crée alors le **CGI** (CIE Glare Index) à partir notamment de la formule d'Hopkinson ainsi que de l'indice de position de Guth.

Une opération similaire de création d'une nouvelle formule à partir de celles existantes a été lancée dans les années 1990 par la CIE pour palier à la complexité de la formulation du CGI faisant intervenir le calcul d'éclairage direct. Les travaux aboutissent à l'indice **UGR** (Unified Glare Rating). Jakubiec et Reinhart précisent que l'indice UGR est une simplification du CGI faite pour des facilités de calculs et qu'il n'est maintenant plus d'une réelle utilité.

Un indice récent, largement utilisé à l'heure actuelle, est le **DGP**. Il a été créé en 2006 par Wienold et Christoffersen. Ils utilisent dans leur étude des caméras CCD (Coupled Charge Device) permettant de mesurer directement les luminances dans le champ de vision d'un observateur. Cette caméra est placée dans une salle dite de référence identique à une autre pièce adjacente dite de test. La salle de test accueille différents sujets à qui on demande d'effectuer certaines tâches. Dans la salle de référence, ils placent la caméra dans une position correspondant à celle des personnes évaluées dans la salle de test. L'objectif de l'expérience est de mesurer ce que chaque personne perçoit dans son champ de vision pendant les tâches qu'ils effectuent. Durant l'expérience, ils changent les caractéristiques des fenêtres et des occultations afin de faire varier l'environnement visuel des sujets de l'expérience. Un questionnaire de satisfaction vis-à-vis de l'environnement visuel est distribué à chaque personne. A la suite de leur expérience, Wienold et Christoffersen comparent les résultats des questionnaires avec les indices DGI et CGI. Ils remarquent alors que les prédictions de satisfaction visuelle des deux indices sont erronées. En revanche, ils observent une corrélation forte entre le pourcentage de personnes gênées et l'éclairage vertical au niveau de l'œil.

Ils aboutissent à la formule donnée en équation (II.2)

Équation II.2 la formule DGP (Source: Bonte, 2014).

$$DGP = 5.87 \cdot 10^{-5} E_v + 9.18 \times 10^{-2} \log \left(\sum_i \frac{L_{s,i}^2 \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} p^2} \right)$$

Jakubiec et Reinhart ont réalisé une étude comparative sur plusieurs indices d'éblouissement dont le DGI, le CGI, l'UGR et le DGP. Après des simulations comportant 144 types de ciels différents, ils arrivent à la conclusion que le DGP est l'indice le plus fiable de ceux qu'ils ont testés. (BONTE, 2014)

Depuis, le calcul du DGP a notamment été inclus dans le logiciel Daysim qui est utilisé pour la conception de bâtiments et les calculs liés à la lumière naturelle.

Résumé La littérature montre que le confort visuel est influencé par deux grandeurs : l'éclairage sur le plan de travail et l'éblouissement. L'éblouissement peut être caractérisé par plusieurs indices, cependant l'indice le plus fiable est le Daylight Glare Probability (DGP) (BONTE, 2014).

Tableau II.5 : récapitulatif présentant les gammes d'évaluation de prévision de l'éblouissement. (Source: Alstan Jakubiec et Reinhart, 2011)

	Imperceptible	perceptible	Gênant, inconfortable	intolérable
DGI	<18	18-24	24-31	>31
UGR	<13	13-22	22-28	>28
CGI	<13	13-22	22-28	>28
VCP	80-100	60-80	10-60	<40
DGP	<0.3	0.3-0.35	0.35-0.4	>0.45

II.3.1.1.5. Vue vers l'extérieur

Certaines expérimentations réalisées pendant les années soixante-dix en Allemagne, sont allées jusqu'à proposer des écoles sans fenêtres en croyant que cela protégerait les élèves des distractions extérieures et diminuerait leurs problèmes de concentration (Walden, 2009. Cité par Iturra, 2011). Aux États-Unis, la crise énergétique des années 70 a également provoqué l'apparition d'écoles sans fenêtres pour économiser l'énergie. L'état de la Floride a même adopté une loi exigeant que toutes les écoles soient conçues avec un système

d'air conditionné et sans fenêtres (Wei, 2002. Cité par Iturra, 2011).

Aujourd'hui les bénéfices associés au contact avec l'extérieur sont reconnus. Kaplan (1995) indique qu'une vue vers l'extérieur permet aux élèves de restaurer et de maintenir leur concentration sur une longue période de temps. De plus, des études montrent qu'une vue lointaine réduit la fatigue de l'œil après avoir réalisé une tâche visuelle rapprochée, telle que la lecture à un bureau (Stein et al., 2006, cité par Celis Mercier, 2009). Dans une recension d'articles sur le sujet, Farley et Veitch (2001) soulignent que les gens préfèrent les espaces avec fenêtres plutôt que des espaces sans fenêtres, en particulier des fenêtres avec des vues de la nature, lesquelles ont un effet important sur le bien-être psychologique et physique.

En général, les normes portant sur les espaces éducatifs assurent la vue vers l'extérieur exigeant un pourcentage minimal d'ouvertures (tableau). Le système de certification environnementale CHPS (Collaborative for High Performance Schools), basé sur les normes de Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), inclut maintenant des exigences spécifiques pour assurer les vues vers l'extérieur. Le système prévoit que 90 % de la surface des salles de classe devrait avoir une vue directe vers l'extérieur

par une fenêtre verticale située à une hauteur située entre 76 cm et 228 cm du sol (COCHPS, 2009).

Tableau II.6 Crédits du système de certification COCHPS associés à la vue sur l'extérieure (source : Iturra, 2011).

	EQ1.2.2 Fournir une ligne de vue directe pour le 90% de la superficie des salles de classe, de la bibliothèque, des zones de lecture, et de l'administration.
1 point	EQ1.2.2 Pour être admissible, un espace doit avoir une surface de vitrage égale ou supérieur à 7 % de la surface du plancher. Le vitrage doit être clair et ne comprend que la surface des fenêtres supérieures à 2.5 pi et inférieures à 7.5 pi du sol. La largeur totale du vitrage pour la vue doit être supérieure à 1% de la surface du plancher.

II.3.1.2. Paramètres dynamiques :

Étant donné que la lumière du jour est dynamique (elle varie selon l'heure et les saisons), la quantité d'éclairage intérieur et extérieur est dépendante du temps (Boubekri, 2008. Cité par Iturra, 2011).

Nous ne pouvons pas donc établir un minimum de FLJ à l'intérieur d'un espace, sans considérer la durée de cet éclairage.

Le principal avantage des indicateurs dynamiques par rapport aux mesures statiques c'est qu'ils permettent d'estimer la quantité et la nature des variations quotidiennes et saisonnières de la lumière du jour pour un site donné avec des événements météorologiques irréguliers. (Reinhart et al., 2006). Il existe au moins 5 indicateurs de ce type :

II.3.1.2.1. Index d'autonomie (DaylightAutonomy- DA)

L'index DA correspond au pourcentage d'heures de l'année où la lumière naturelle est suffisante pour atteindre un seuil d'éclairement minimum (Association Suisse des Électriciens 1989). Selon cette norme, le terme est une fonction du facteur de lumière du jour et un minimum de niveau d'éclairement requis. En 2001, Reinhart et Walkenhorst redéfinissent le terme comme le pourcentage du temps occupé de l'année où l'exigence d'éclairement minimum au niveau d'un capteur est assurée par la lumière naturelle (Reinhart et Walkenhorst, 2001).

II.3.1.2.2. Eclairage utile (Useful Daylight Illuminances – UDI)

Proposé par Mardaljevic et Nabil (2005). Cet indicateur est basé sur l'éclairage produit sur le plan de travail, et il vise à déterminer les périodes auxquelles les niveaux d'éclairage naturel sont «utiles» pour l'occupant, produisant des espaces ni trop sombres (100 lux), ni trop clairs (2000 lux). Le seuil supérieur est destiné à détecter les moments où une surabondance de lumière du jour pourrait conduire à l'inconfort thermique et/ou visuel. L'UDI apparaît très intéressant pour l'étude du comportement lumineux à l'intérieur des bureaux (Cantin, 2008).

II.3.1.2.3. Autonomie continue d'éclairage naturel (Continuous Daylight Autonomy – DA con)

Cet indicateur proposé par Rogers (2006) attribue un crédit partiel à chaque intervalle de temps lorsque l'éclairage se situe en dessous du niveau minimum. Par exemple, dans le cas où 500 lux sont nécessaires et 400 lux sont fournis par la lumière du jour à un intervalle de temps donné, la fraction de crédit correspond à : $400 \text{ lx} / 500 \text{ lx} = 0.8$. Le résultat de cette modification métrique est un seuil de la transition plus flexible entre le respect et la non-conformité (Reinhart et al, 2006).

II.3.1.2.4. Exposition annuelle à la lumière (Annual Light Exposure)

Cet indicateur de performance est destiné à la conception des espaces qui contiennent des œuvres à la lumière (Annual photosensibles, telles que les musées. Il est défini comme le montant cumulé de la lumière visible (Light Exposure) incidente sur un point d'intérêt au cours d'une année. Cette exposition à la lumière est mesurée en heures lux par an (Reinhart et al., 2006).

II.3.1.2.5. Ratio d'éclairage vertical / horizontal (Ratio VH)

Proposé par Love et Nawab (1994) afin de remédier aux limitations du FLJ. En effet, les résultats obtenus par le calcul du ratio VH sont très stables, contrairement aux résultats fournis par le FLJ. De plus, le ratio VH permet l'étude d'un système d'éclairage mixte tout en s'accommodant de la présence de lumière directe, ainsi que permet de recueillir des informations supplémentaires sur les conditions d'éblouissement, de contraste et de réflexions internes spatiales (Cantin, 2008).

II.3.2. L'Agrément

La notion d'agrément dépasse celle du confort par la sensation de plaisir et d'agréable lors d'accomplissement d'une tâche visuelle (Mudri. L, 2002). Contrairement à la notion du confort, l'agrément se caractérise par la présence d'une attention et d'une tension psychologique, avec des degrés variables (Mudri. L, 2002). L'agrément relève des aspects psychologiques. Ils sont donc relatifs à l'utilisateur et englobent : la qualité de la vue sur l'extérieur, la beauté du système conceptuel de la baie et l'attractivité générale de l'espace. Ces tensions psychologiques peuvent avoir à la fois des satisfactions visuelles avec des gênes peut être sonores, thermiques, ...etc. l'agrément est une sensation très subjective, variable d'une société à une autre et d'un individu à un autre. (Mudri. L, 2002) Donc les deux sensations sont nécessaires pour décrire une ambiance lumineuse. Le confort visuel seul risque de produire des sensations ennuyeuses, comme l'agrément seul peut provoquer des gênes (Mudri. L, 2002). Pour qualifier une ambiance lumineuse comme confortable et agréable, nous nous recourons au contraste et dégradation de lumière et des couleurs pour les sciences « dures », comme nous pouvons évaluer le niveau d'éclairage et de luminance de point de vue des sciences appliquées (Mudri. L, 2002).

II. CONCLUSION

Ce qui ressort en premier lieu dans ce chapitre les mutations qui ont touché les salles de classe au fil du temps, ces mutations témoignent de besoins nouveaux en matière d'éclairage intérieur. Néanmoins, avec l'utilisation massive des ordinateurs dans les écoles, et la part de plus en plus importante qu'ils prennent dans l'enseignement, l'idée l'élaboration d'un éclairage sans éblouissement est devenue incontournable (Barnitt, 2003. Cité par Higgins, S et al, 2005). Quand un travail sur écran est affecté à un espace en cours de conception, le niveau d'éclairage global ainsi que les ouvertures et les luminaires doivent être reconsidérés (Dubois, 2001).

Le confort visuel a une importance particulière dans les espaces d'enseignement. Aux effets positifs sur la performance académique des élèves, il faut ajouter aussi des impacts sur la santé et sur d'autres systèmes biologiques non visuels (Boyce, 2010). Néanmoins, l'excès d'éclairage ou l'absence de contrôle peut provoquer des effets négatifs, tels que l'éblouissement. La façon dont la lumière naturelle est fournie est donc déterminante pour la qualité des milieux scolaires. Plusieurs méthodes tentent d'évaluer l'éblouissement avec des critères plus ou moins complexes à définir, le contraste et l'uniformité de la luminance, ainsi

que sa distribution dans le champ visuel de l'occupant sont des critères en vue de mesurer le degré d'éblouissement. Une étude comparative de **Jakubiec et Reinhart** sur plusieurs indices d'éblouissement dont le DGI, le CGI, l'UGR et le DGP. Après des simulations comportant 144 types de ciels différents, ils arrivent à la conclusion que le DGP est l'indice le plus fiable de ceux qu'ils ont testés (Bonte, 2014).

Diverses approches et standards ont été développés pour assurer les conditions optimales d'éclairage. Une classification de base est celle qui différencie les modèles statiques et les modèles dynamiques. Malgré l'avancement des critères d'évaluation dynamiques, les paramètres statiques demeurent valides grâce à leur simplicité et facilité d'application.

Les salles de classe doivent donc fournir un environnement qui s'adapte au processus d'apprentissage et qui l'améliore, qui encourage l'innovation et qui soit un outil d'apprentissage, et non un monument dédié à l'esthétique.

*CHAPITRE III : LA PRÉDÉTERMINATION DE
L'ÉCLAIRAGE NATUREL.*

« It seeks to show that good daylight design is not a restriction of architectural expression – on the contrary, it is more likely to act as an inspiration and foundation for good architecture. »

Marc FONTOYNONT (Baker & Steemers, 2001)

III. INTRODUCTION

L'évolution qu'a connue la production architecturale au cours du 20^e siècle a donné naissance à une nouvelle génération de contraintes liées à : la gestion des problèmes techniques, la production des saisies des documents techniques et au respect des normes de sécurité (Maamari, 2004). L'évolution de l'expression architecturale elle-même a donné lieu également à de nouvelles contraintes résultant de la genèse de formes architecturales de plus en plus complexes. Les architectes et globalement les concepteurs ont cherché à trouver, développer et adopter des méthodes et des outils permettant de s'adapter à ces nouvelles conditions de conception de manière à la fois plus facile et plus rapide. Un besoin qui a dynamisé l'évolution des systèmes informatisés pendant cette époque, ce qui a rendu possible l'évaluation de la qualité des ambiances lumineuses conçues et donc estimer l'impact les effets et des choix adoptés durant les phases de la conception sur les performances visuelles, environnementales et énergétiques de leurs projets (Tourre, 2007).

Le concept de prise en compte de la lumière du jour étant déterminé très tôt dans la conception, les outils d'aide à la conception de cette ambiance lumineuse doivent naturellement être utilisables dans la phase très amont de la conception, dans la phase d'esquisse (Mudri, 1996).

Selon Gallas, (2013), ces méthodes et outils ont des approches différentes divisées en trois grandes familles :

- une première famille exploite les références
- une deuxième famille utilise des modèles physiques
- une troisième famille fait appel à des modèles numériques.

Ce chapitre nous en dresserons un état de l'art de ces outils et ces méthodes à pour objectif de les classer et de les caractériser, cela par la mise en relief de leurs apports dans la maîtrise du comportement de la lumière naturelle.

III.1. la conception architecturale.

III.1.1. L'acte de concevoir.

Une première définition peut être référée au sens premier de la conception "maternelle", où l'acte de concevoir permet le commencement d'une nouvelle existence, ou, à son sens intellectuel pour lequel concevoir signifie saisir et maîtriser par l'esprit (Borillo, 2002. Cité par Tornay, 2010).

Dans le domaine des recherches scientifiques, plusieurs savants, philosophes et autres ont essayé de donner des définitions de la conception sur la base de leurs expériences et le domaine de la conception (mécanique, architecturale...etc.) auquel ils appartiennent (Jones. J¹⁷, Cité par Gaouas, 2013). Les plus connues d'entre elles peuvent être les suivantes :

- Trouver les vrais composants physiques de la structure physique (Alexander, 1963).
- La prise de décision dans le contexte d'incertitude avec des risques élevés pour l'erreur (Asimov, 1962).
- La simulation de ce que nous voulons faire avant de faire (Booker, 1964).
- Une activité créatrice, autrement dit, produire une chose nouvelle et utile qui n'a pas existé auparavant (Reswick, 1965)
- La solution optimale pour des besoins réels d'un ensemble de circonstances particulières (Matchett, 1968).
- La conception est également une activité intentionnelle, contraignante, décisionnelle, exploratoire et pédagogique (Gero, 1996).
- une opération non-déterministe qui produit une nouveauté formelle (Knight et Stiny, 2001).
- « Engineering design » est l'utilisation des principes scientifiques, des informations techniques et de l'imagination dans la définition d'une structure mécanique, machine ou un système pour exécuter des fonctions prédéfinies avec une économie et une efficacité maximales (Feilden, 1963).

Il est à noter que parmi les définitions ci-dessus, y a celles qui mettent l'accent sur une discipline spécifique de conception, celles qui sont générales et d'autres qui évoquent certaines caractéristiques du processus de conception lui-même. Deux types principaux de

¹⁷ Jones. J, Design Methods: Seeds of Human Futures, Wiley-Interscience, London, UK, 1970

définitions peuvent être distingués : «la conception est ...» et « la conception en tant que ...». La conception est l'activité de transformation de l'état du produit en cours de conception ou du processus de conception en un autre état pour atteindre l'objectif de conception. Le concepteur peut effectuer cette activité en produisant une représentation du produit en cours de conception ou du processus de conception ou en changeant le processus de conception lui-même¹⁸ (Reymen,I. Cité par Gaouas, 2013).

III.1.2. La conception en architecture

La conception architecturale, considérée comme un processus artistique, ne doit « pas seulement donner une expression aux formes et aux idées qui sont déjà développées, mais doit aussi arriver par l'esprit à créer de nouvelles idées et de nouvelles formes » (Maki, 1995. Cité par Biron, 2008). « Par l'esprit », mais aussi par le rapport direct avec la matière. Des espaces, des sensations et des ambiances peuvent être générés, non pas en illustrant une idée et en matérialisant un concept par une représentation, ou à partir de concepts opératoires préalables, mais en les faisant émerger à partir de manipulations matérielles simples (Biron, 2008)

L'acte de concevoir a fait l'objet et continue de faire l'objet d'investigations importantes et variées (Boudon 1992.Cité par Hegron), ainsi plusieurs auteurs ont entamé une réflexion sur les concepts fondamentaux de la conception architecturale. Comme celle de Jean Charles Lebahar en 1983 qui a annoncé que la conception architecturale fait apparaître trois grandes phases :

a) **Le diagnostic architectural** : C'est dans cette phase de résolution du problème que l'architecte va le cerner et le définir en respectant des contraintes de base. Il va alors prendre en compte les contraintes financières du client, la surface et topologie du terrain, les contraintes écologiques, juridique, les règles de conformité. Il va pour cela visiter les lieux, discuter avec son client, mais aussi utiliser des documents liés à ces données : des photographies, des plans de géomètre, etc. Combinant le tout avec ses connaissances et savoirs propres, il est alors en phase d'exploration dont le résultat sera une première «*base graphique de simulation*», mélange de notes et de premiers dessins.

18 Reymen. I, Improving Design Processes through Structured Reflection A Domain-independent Approach, Thèse de doctorat, Eind Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands 2001.

b) **La recherche de l'objet par simulation graphique** : Dès lors, le concepteur va entamer ce que nous avons appelé la génération des solutions et leur évaluation, dans un processus incrémental et itératif. Et c'est le dessin qui va être le vecteur privilégié de cette démarche. Il va supporter la simulation, basée sur les transformations successives que va développer le raisonnement de l'architecte, afin d'atteindre les solutions adéquates au problème posé. Dans cette situation, comme nous l'avons déjà évoqué en parlant de conversation entre le concepteur et son dessin ; le dessin est plus qu'un support, il représente, comme le souligne Lebahar, «l'objet en création et la pensée qui le crée».

c) **L'établissement du modèle de construction** : Cette phase est l'établissement des représentations graphiques précises, destinées à rendre claire la solution pour les constructeurs. C'est la «décision définitive concernant l'ensemble du projet» (plans, dessins précis et métrés, avec une échelle spécifiée, etc.).

Daniel Siret (1997) considère la conception architecturale comme un processus de formulation/résolution concomitante d'un problème implicite, jamais posé ni jamais résolu définitivement. Sur cette base, Siret propose un schéma représentant à la fois la nature du projet architectural et la dynamique du processus de conception architecturale dans lequel il introduit deux classes d'éléments :

- Les "intentions" qu'il présente comme l'ensemble des spécifications qui conduisent à la résolution du problème ; elles représentent l'« énoncé » du projet.
- Les "Formes" qui regroupent l'ensemble des spécifications de l'objet architectural à construire, donc elles représentent les « solutions » du projet.

Après avoir mis en place ces trois composantes de son modèle du projet, Siret ajoute que les actions sur ces dernières peuvent être de deux natures : Les actions d'exposition : celles qui partent des formes pour ensuite évaluer le degré de concrétisation des intentions ; cette classe d'action peut être associée aux problèmes directs. Les actions de réalisation : qui partent des intentions pour ensuite déterminer les formes susceptibles de les produire ; cette classe d'action peut être associée aux problèmes inverses (Siret, 1997).

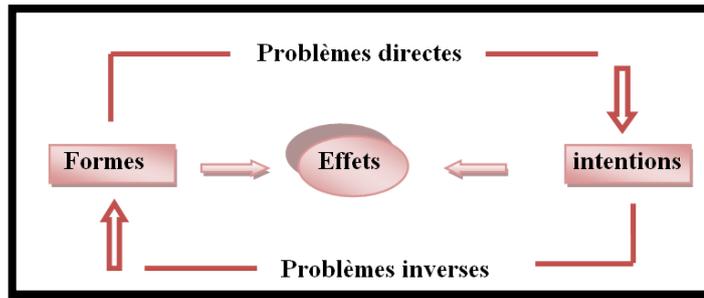


Figure III.40: Représentation de dynamique du processus de conception architectural (source : Siret, 1997)

III.1.3. Les outils de la conception architecturale.

Les architectes/concepteurs ont souvent recours à différents outils pendant de la conception de leurs projets. On peut penser, entre autres, aux dessins, maquettes et outils numériques (CAO, visualisation et simulation). Les guides et codes du bâtiment sont aussi considérés comme des outils. Tous ces supports de travail peuvent être décrits selon quatre caractéristiques : perceptuel, conceptuel, statique et dynamique (Gallas, 2013). Au niveau de la représentation, les outils sont soit perceptuels ou conceptuels (Lawrence, 1993). Un outil perceptuel est indissociable du caractère expérientiel de l'utilisateur alors qu'un outil conceptuel offre une représentation concrète d'une idée tout en laissant place à l'interprétation du concepteur. Sur le plan du traitement des données, ils sont soit statiques ou dynamiques. Un outil dynamique¹⁹ est en mesure d'offrir une certaine interaction avec l'utilisateur. Par exemple, un logiciel de simulation peut être considéré comme un outil dynamique parce qu'il génère un résultat à partir des données que l'utilisateur lui fournit. Un outil statique ne possède pas cette propriété. Par exemple, un logiciel de conception architecturale ne fait que représenter ce que le concepteur imagine (Gagnon, 2012).

¹⁹ On utilise par contre aussi le terme « outil de simulation dynamique » pour référer aux calculs de simulation réalisés de manière dynamique et itérative,

Tableau III.7: Typologies des outils d'aide à la conception (inspiré de Lawrence, 1993) source (Gagnon, 2012)

	Perceptuel	Conceptuel
Statique	Croquis, Photographie&Dessin	Plan Cartes
Dynamique	Simulateur	Logiciels de simulation Ordinateur connecté à l'internet

III.2. l'assistance à la conception de l'éclairage naturel dans le projet architectural.

La prise en compte de la lumière naturelle est un phénomène complexe qui fait appel à plusieurs d'informations en rapport avec le projet d'architecture. Ces informations ne sont pas souvent disponibles dès les premières phases du processus de conception architecturale. Cette intégration est abordée à plusieurs niveaux suivant l'état d'avancement du projet et en s'adaptant aux informations disponibles. Plusieurs méthode et outils ont été développés. Ils ont des approches différentes divisées en trois grandes familles (Gallas, 2013):

III.2.1. Les supports d'assistance exploitant les références.

Le concept "référence" constitue un élément essentiel dans la production architecturale, ainsi plus la référence est potentielle plus le résultat est riche (Tornay, 2010). Le travail de conception, avec référence particulière à l'éclairage naturel, a été continue d'être la préoccupation de nombreux architectes depuis l'antiquité jusqu'à nos jours (Gallas, 2013).

Le phénomène de référenciation ²⁰ se fait en étapes simultanées, en effet, ont défini que le phénomène comme étant un enchaînement d'opérations composé de quatre opérations simultanés pour tenter de décrire l'activité de perception-conception qui sont :

- **Faire** : fabriquer par sélection, par choix et par assemblage d'éléments antérieurs.
- **Voire** : activer le regard ; appréhender les objets, rechercher du sens (prendre des photos, choisir le cadrage).

²⁰Référenciation : terme utilisé pour représenter la mise en référence

- **Nommer** : réinterpréter les objets par des mots « nouveaux » ; perception réfléchie.
- **Recommencer** : moment de recherche ; produire des maquettes : dispositifs raisonnés qui concernent la fabrication du nouveau.

III.2.1.1. Les documents de références

Ces supports représentent un ensemble de projets considérés comme des modèles à suivre proposant des règles de conception ou des solutions à suivre pour atteindre un objectif dont le concepteur essaye de leur attribuer une valeur référentielle (Gallas, 2013).

«Vitruve, détenteur de l'autorité, objet d'étude nécessaire, référent obligatoire de tout travail architectural (théorique et appliqué), tel est bien le credo de tous.» (Choay, 1996. Cité par Gallas, 2013)

La forme des références a évolué tout au long de l'histoire de l'architecture : **du traité d'architecture** ou de **l'ouvrage de théorie de l'architecture**²¹ qui essayent de structurer, d'une manière théorique, les activités de conception architecturale à des ouvrages où les architectes exposent leur vision de l'architecture ainsi que des projets, réalisés ou imaginés, leur attribuant ainsi un caractère référentiel(Gallas, 2013).

III.2.1.2. Les outils d'exploration de références

Nous assistons actuellement à un mouvement de numérisation et de virtualisation des références architecturales des ambiances lumineuses. Ces références prennent la forme d'images représentant des effets de lumière naturelle accompagnées d'attributs donnant des informations complémentaires facilitant la lecture et l'interprétation de la référence (nom du projet, architecte, localisation, contexte social, type de dispositif d'ouverture). Le mouvement de numérisation s'est matérialisé par la mise en place d'outils de parcours et d'exploration de base de données de références (Gallas, 2013).

Ces outils sont classés en deux catégories selon le type de fonction qu'ils proposent :

La première catégorie d'outils offre des fonctions de recherche, de navigation et d'identification de références ciblée à partir d'une base constituée principalement d'images

²¹ Exemples : Les dix livres d'architecture de Vitruve (Vitruve, 1684) / Entretiens sur l'architecture d'Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc (Viollet-Le-Duc, 1863) / Vers une Architecture/Le Corbusier (Corbusier, 1923) / S, M, L, XL/Rem Koolhaas et Bruce Mau (Koolhaas, Mau, 1997).

et d'attributs sémantiques. Ces images peuvent être issues de projets réels ou de simulations photo-réalistes. Parmi ces outils on peut citer :

1) Le "Day@mbiance"

Il s'agit d'un outil d'assistance à la conception des ambiances lumineuses résultant d'un travail de recherche qui propose d'utiliser des images de référence pour aider le concepteur à formaliser ses idées et ses intentions. Les images sont indexées²² à l'aide du logiciel *IMAGE*. Son interface présente une mosaïque d'images issues de projets existants représentant des effets de lumière naturelle. L'utilisateur peut parcourir la base en sélectionnant ou rejetant des images permettant au système de générer une nouvelle mosaïque prenant en compte les choix. L'interface propose un second mode de navigation de type "Graphe" qui offre la possibilité de visualiser un ensemble d'images sémantiquement proches (Chaabouni, 2011).

À partir de ces modes de navigations et des sélections, le concepteur peut construire des albums d'images. La zone de dessin donne la possibilité à l'utilisateur d'intégrer des images sélectionnées afin de les annoter et de dessiner des croquis d'intentions.

²² *L'indexation* est une opération qui a pour but de faciliter l'accès au contenu d'un document ou d'un ensemble de documents à partir d'un sujet ou d'un ensemble de sujets (Chaabouni, 2011).

L'indexation d'images peut s'effectuer actuellement sous deux formes, l'indexation par le contenu graphique et l'indexation par le contenu sémantique. L'indexation par le contenu **graphique** est automatique et basée sur les caractéristiques physiques et visuelles de l'image. L'indexation par le contenu **sémantique** consiste à attacher à une image des termes (mots-clé, concepts) désignant le sens véhiculé par l'image (Chaabouni, 2011).

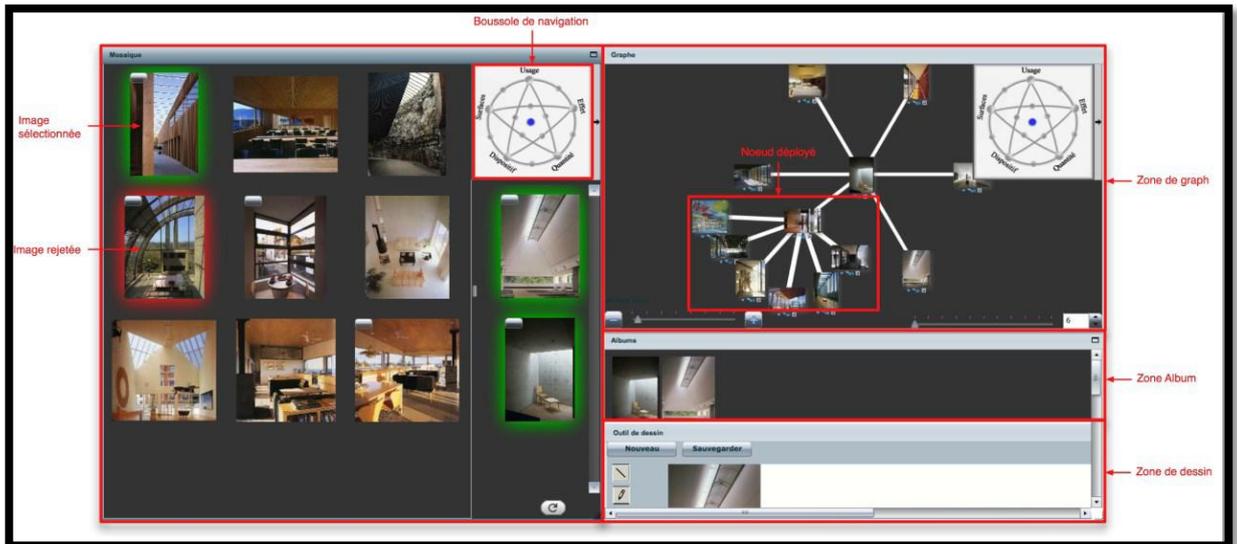


Figure III.41 : Interface de Day@mbiance (Chaabouni, 2011)

2) L'outil « *iMage* »

L'outil « *iMage* » développé au CRAI par Pascal Humbert²³. Cet outil est générique et peut être utilisé pour indexer n'importe quel corpus d'images à partir du moment où le thésaurus²⁴ est fourni. Le thésaurus est créé à partir de mots clefs représentatifs de chaque classe et sous classe, il est évolutif car il est possible d'en ajouter ou d'en retirer à tout moment. Les classes permettent d'indexer des images et la zone d'indexation permet de donner des pondérations²⁵ à ces classes et sous classes.

Le logiciel s'organise en plusieurs zones : en **A** se trouve le thésaurus, en **B** nous pouvons voir la zone d'indexation des images (le contexte et les descripteurs pondérés), en **C** nous avons les informations sur l'image (source, date, etc.), en **D** l'aperçu de l'image active et la liste d'images contenues dans la base en **E**. Une zone de recherche facilite la navigation par catégories, nom du concepteur ou nom de l'image.

²³ Docteur en informatique et ingénieur de recherche *Map-Crai*

²⁴ Un thésaurus, est une liste organisée de termes contrôlés et normalisés (descripteurs et non descripteurs) représentant les concepts d'un domaine de la connaissance.

²⁵ La pondération : l'idée derrière la pondération des termes d'indexation est d'affecter à chaque terme un poids pour traduire son importance dans la description de l'image. (Aitchison and Gilchrist, 1992).

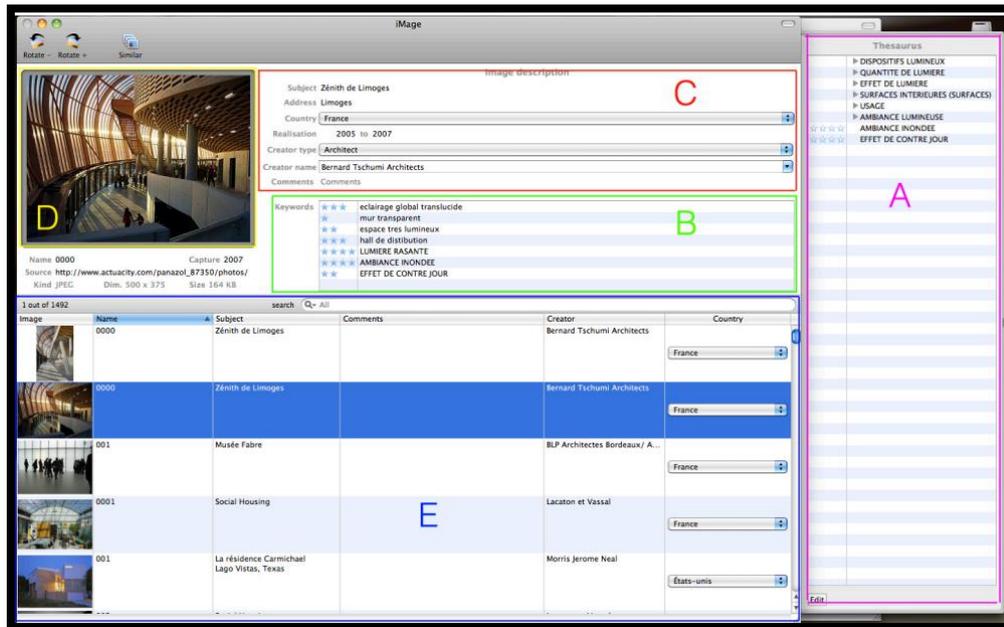


Figure 42 : Interface d'iMage (source : Cervantès, 2012)

La deuxième catégorie intègre les outils de référencement typologique « *En se dégageant du caractère circonstanciel des modèles historiques, l'approche typologique permet en effet de mieux poser le problème de l'articulation entre les différents points de vue pouvant participer à la lecture et à l'évaluation des "effets" ou "performance" d'un dispositif architectural* » (Lassance, 1998). Lassance propose, en fin de thèse, un outil de type hypertexte appelé **ECLAIRAGES**. Cet outil permet de faire des recherches par projet de références, par point de vue (style, composition, façade, forme globale, etc.) ou par attributs (mots clefs). Il permet de consulter un certain nombre de projets de référence, un corpus d'ambiances lumineuses. L'outil développé par Lassance permet de travailler le projet en se servant de références et de s'informer (Cervantès, 2012).

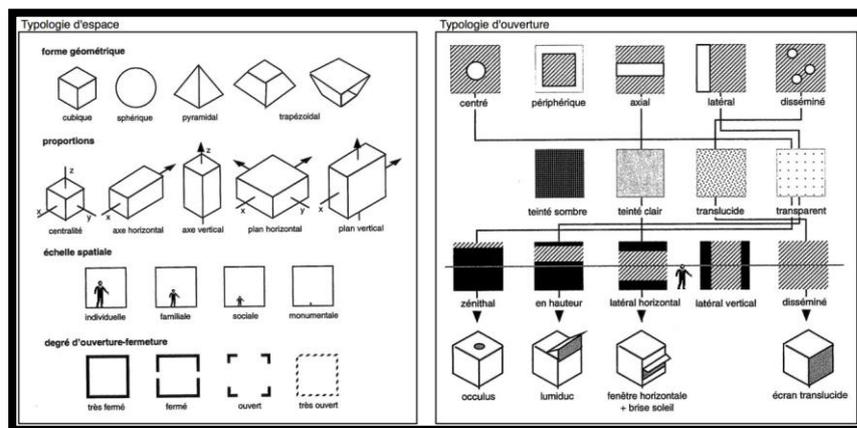


Figure III.43 : Définition et caractérisation des typologies d'espace et d'ouverture selon GuilhermLassance (Lassance, 1998)

1) Le "Daylight Design Variation Book"

C'est un outil de gestion de référence typologique implémentée dans une interface web qui présente une liste d'images de rendus photoréalistes prises à l'intérieur de configurations architecturales simples générant différents types d'effets de lumières naturelles. Les images sont classées selon le type de dispositif d'ouverture (fenêtre verticale, horizontale, zénithale) et le nombre de percements qui le constitue. L'utilisateur peut évaluer et comparer le comportement lumineux de deux configurations proposées à travers des simulations photoréalistes des apports lumineux (sur les parois latérales, le sol et le plafond), des simulations en fausses couleurs des luminances (vue intérieure de l'espace en direction de l'ouverture) et des diagrammes de valeurs de FLJ (au niveau du plan de travail et en fonction de la profondeur de l'espace). Chaque type d'ouverture est illustré et référencé par une liste de projets réels reproduisant la même configuration dans un contexte réel (Gallas, 2013).

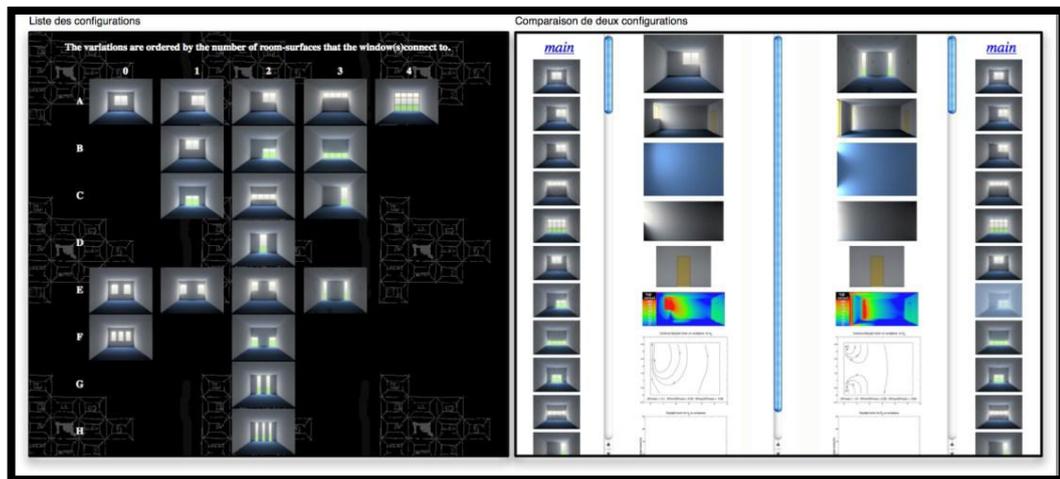


Figure III.44 : Interface et fonctions de "Daylight Design Variation Book" (Diepens, 2000)

2) La "Méthode de Demers"

Dans le même contexte des méthodes et outils de référencement typologique, Claude Demers (1997) a proposé une méthode d'assistance à la conception faisant appel à des images de références représentant des types d'effet de lumière. Ces photos sont prises à partir de modèles physiques de configurations architecturales intégrant différents dispositifs d'ouverture et générant des effets de lumière. Cette méthode fait appel à un logiciel de traitement d'images dans le but de combiner et d'associer des images d'effets de lumière naturelle représentés afin de suggérer de nouveaux effets et d'imaginer le dispositif ou la configuration architecturale qui permettra de le générer. «*En conception l'approche typologique permet d'aborder de nouvelles problématiques en pleine connaissance des précédents similaires*» (Demers, 1997).

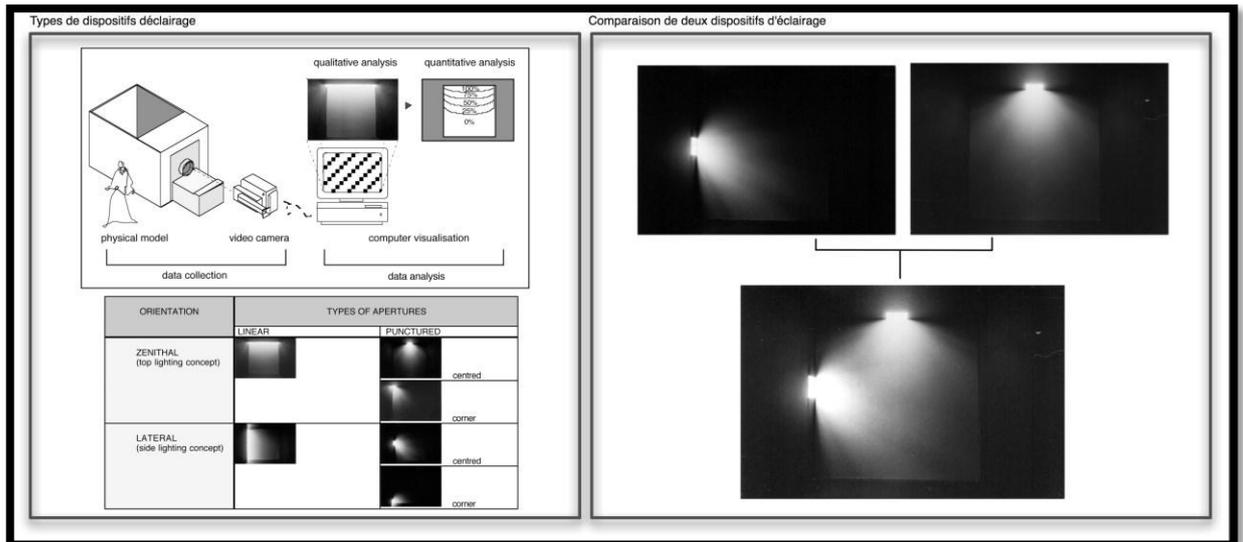


Figure III.45 : Méthode de création et de combinaison d'effets de lumière naturelle à partir d'images de référence (Demers, 2000)

III.2.1.3. Les manuels techniques

L'évolution des contraintes techniques en rapport avec l'architecture a donné lieu à un besoin d'assistance plus ciblé vers des champs de compétences plus techniques et très précises. Ce besoin a donné naissance à des manuels de conception qui constituent une interprétation et une simplification des règles techniques, des lois physiques et des méthodes de calculs appliquées à la conception architecturale. Ils sont souvent organisés sous deux volets, un premier théorique intégrant des connaissances physiques autour de l'origine, des sources, du comportement, de la quantification et de la qualification de la lumière et un deuxième, plus pratique et appliqué à l'architecture. Ce volet présente des évaluations de cas d'études de configurations architecturales et des interprétations aidant le concepteur à choisir et à dimensionner les dispositifs d'éclairage adaptés à leurs projets (Gallas, 2013).

Ce type de support constitue la première forme d'assistance à la maîtrise de la lumière naturelle auprès des architectes. Il est le résultat d'une culture d'utilisation de la référence comme moyen d'inspiration ou de résolution de problème acquise par les architectes durant leurs formations et tout au long de leur parcours professionnel. Une des limites de ce type d'assistance est que l'aide apportée, particulièrement dans les domaines techniques, n'est pas adaptée à tous les contextes de conception, mais seulement à ceux prévus dans le cadre des études proposées par l'auteur (Gallas, 2013).



Figure III.46 Manuels de conception : Daylight design of buildings / Nick Baker et Koen Steemers (Baker, K. A. Steemers, 2002) / L'éclairage naturel des bâtiments/Sigrid Reiter et André De Herde (Reiter, De Herde, 2004) / Construire avec la lumière naturelle / Marc Fontoynt, Michel Perraud, Pascale Avouac et Jean-Marc Lauby (Fontoynt et al., 2011)

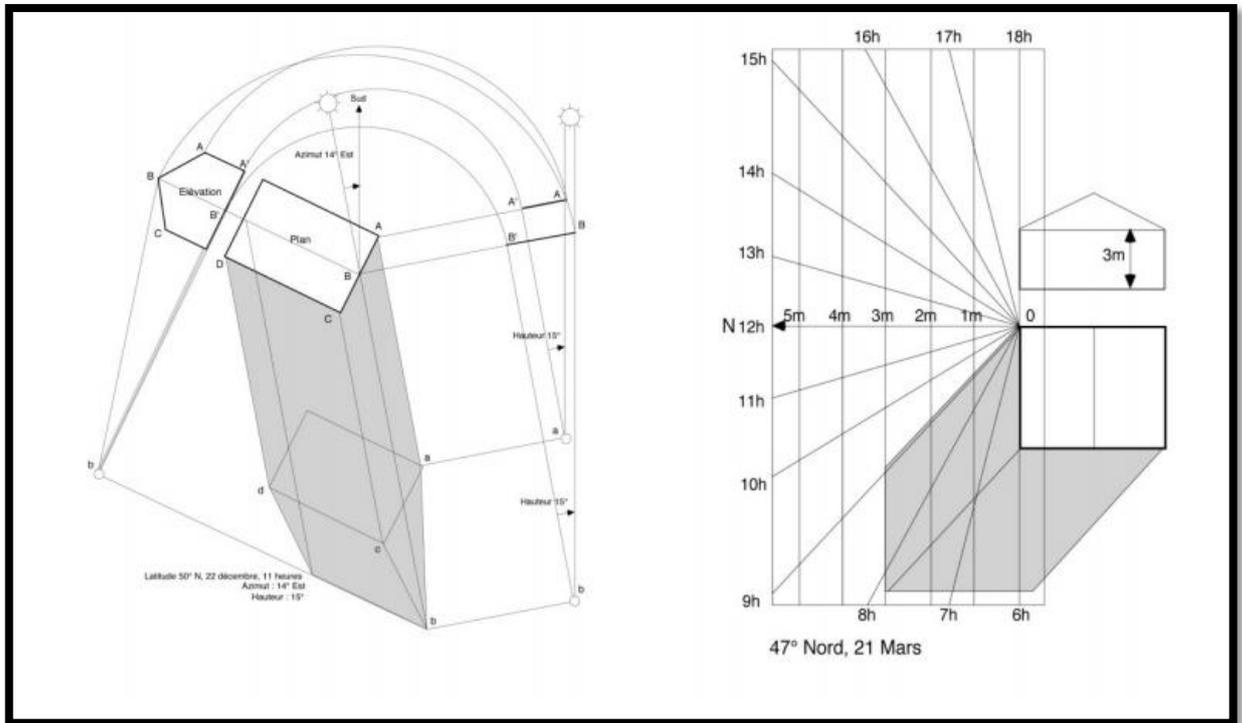
III.2.1.4 Les abaques de représentation et de calcul

Les abaques sont une forme d'interprétation pratique et appliquée des connaissances théoriques de la quantification (calcul de FLJ) et de qualification des apports solaires (tracé des ombres). Ce support d'assistance de type abaque fait appel à des techniques de construction et de représentation graphique permettent de donner une réponse au besoin d'anticiper et de maîtriser le comportement de la lumière naturelle pour un bâtiment projeté (Gallas, 2013).

« Elles mettent à profit les propriétés géométriques des différents diagrammes solaires » pour proposer une représentation des tracés des ombres d'une configuration spatiale donnée ainsi que le tracé des masques et l'évaluation des périodes d'ensoleillement en un point déterminé (Siret, 1997).

Le premier type d'abaques permet de définir graphiquement le tracé des ombres propres ou portées d'un volume à une date et à un horaire bien précis déterminant la direction des rayons solaires. Ces derniers sont obtenus à travers différents types de diagrammes solaires. Ils offrent plusieurs niveaux de simplification de la construction géométrique des rayons de soleil. Parmi ces derniers le gnomon ou le diagramme MT qui permettent de représenter le tracé des ombres portées par simple report des hauteurs (Siret, 1997). L'utilisation de ce type de méthode d'évaluation fait appel à une construction géométrique complexe et un temps

d'exécution conséquent qui demeure difficilement intégrable à un processus de conception itératif enchainant des activités de création, d'évaluation et de modification (Gallas, 2013).



Le deuxième type d'abaque porte sur la dimension quantitative de la lumière naturelle. Il s'agit d'une interprétation des équations complexes de calcul des apports lumineux sous la forme de feuilles de calcul.

LUMcalcul® offre la possibilité de la saisie des valeurs d'entrées (dimension des ouvertures, facteur de réflexion des parois et facteur de transmission du vitrage) et le calcul des fonctions afin de donner des évaluations rapides du comportement lumineux des propositions architecturales étudiées (FLJ et éclairage).

Les paramètres d'entrées sont détaillés, interprétés sous la forme de graphiques et accompagnés de bulles d'explications. Ceci permet de simplifier la détermination et la saisie des valeurs attribuées aux paramètres d'entrées. Les résultats sont calculés immédiatement et représentés sous la forme de valeurs numériques (valeur de facteur de lumière du jour moyen), graphiques (diagrammes), d'appréciations qualitatives. Les diagrammes mettent en relation la variation de la quantité des apports lumineux en fonction de paramètres comme la taille des ouvertures ou le facteur de réflexion des surfaces (Gallas, 2013).

Les appréciations constituent des interprétations sensibles des valeurs quantitatives (FLJ) créant « un lien à la perception de brillance ainsi qu'à la contribution à l'éclairage naturel des espaces étudiés » (Demers, Potvin, 2004). Ce type de support offre la possibilité d'évaluer d'une manière rapide et simple la variation du comportement lumineux en fonction de paramètres de caractérisation de l'espace et du dispositif d'éclairage. LUMcalcul® présente un potentiel d'assistance à la conception adapté aux phases conceptuelles où toutes les possibilités sont envisageables.

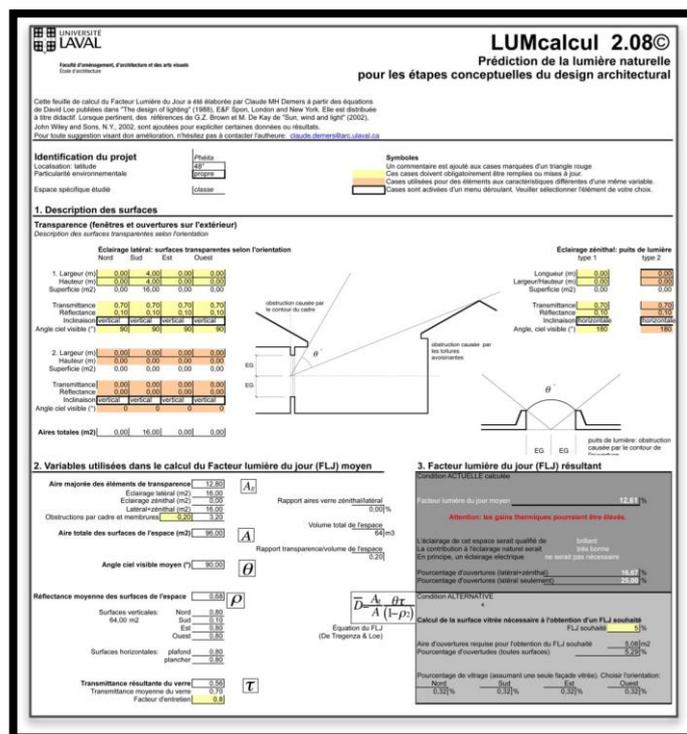


Figure III.48: Interface de la feuille de calcul LUMcalcul® (Demers, Potvin, 2004)

III.2.2. Supports d'assistance exploitant les modèles physiques

Cette forme d'assistance repose sur l'utilisation du modèle réduit ou maquette qui se traduit par la construction tridimensionnelle fidèle à la réalité matérielle d'une œuvre projetée à travers laquelle le concepteur évalue la validité et la solidité de sa proposition.

La maquette est le premier type de modèle physique utilisé pour assister le concepteur dans sa démarche de conception. Elle met en place une première confrontation du projet avec la réalité physique à une échelle réduite et avec des degrés différents de simplification. Les maquettes constituent aussi pour les architectes un moyen de communication sur leur démarche et leurs choix de conception (Gallas, 2013). La maquette d'étude est utilisée pour

l'évaluation du comportement lumineux d'une configuration architecturale. Ce type d'évaluation est réalisé par un dispositif appelé *Héliodon* qui consiste à éclairer une maquette physique par une source de lumière naturelle (soleil) ou artificielle (spot). Il « permet à l'expérimentateur d'étudier les problèmes d'ombres portées, de pénétration du rayonnement direct dans le bâtiment, de protection solaire » (Michel, 1999). Ce dispositif est dédié à l'étude de l'aspect qualitatif de la lumière et son rapport à l'environnement bâti par l'utilisation de maquettes volumétriques représentant le projet à réaliser (Gallas, 2013).

Un autre type de dispositif d'évaluation existe sous la forme d'une **boîte à miroirs éclairée** par des tubes fluorescents de type lumière du jour simulant ainsi des conditions de ciel couvert. Ce dispositif d'évaluation peut être également constitué d'un dôme de luminaires représentant la voute céleste et reproduisant le comportement de plusieurs types de ciels (clair, couvert et mixte). La configuration de ce type de dispositif sert à contrôler la composante diffuse de la lumière naturelle. Des caméras sont positionnées à l'intérieur des maquettes afin de réaliser des images ou des captures vidéo aidant le concepteur à visualiser l'effet de lumière générée. Ces dispositifs peuvent être associés à des instruments de mesure permettant de quantifier les apports solaires dans des zones déterminées sous différentes conditions d'éclairage proche de la réalité. À partir de ces résultats qualitatif et quantitatif, le concepteur peut mesurer l'influence de ses choix sur le comportement lumineux de l'espace à concevoir.



Figure III.49: Heliodon - Texas A&M's College of Architecture / Le ciel artificiel - Université Laval / Le SkyDome - The Welch School of Architecture (source: Gallas, 2013)

Les *héliodons* et les *ciels artificiels* offrent aux concepteurs une aide et une assistance à la maîtrise de la lumière qui peut accompagner le projet dès ses premières phases. En effet, ce type de dispositif permet l'évaluation du comportement lumineux à partir de simples maquettes volumétriques de très faible niveau de détail jusqu'à des modèles réduits précis et proches de la réalité matérielle du projet à concevoir.

Les maquettes physiques sont faciles à manipuler et constitue un objet maîtrisé et apprécié par les architectes. En revanche, elles demandent un temps de préparation assez conséquent avec un usage souvent unique et des possibilités de modification très limitées. Le prototypage rapide exploitant les nouvelles fonctions de découpage et de maquettage numérique peut apporter des solutions favorisant l'utilisation de la maquette physique. En effet, les **imprimantes 3D** ainsi que les machines à découpe laser apportent un gain en terme de temps d'exécution et de précision pour la réalisation des maquettes et particulièrement celles de formes complexes et celles destinées à des études physiques avancées.

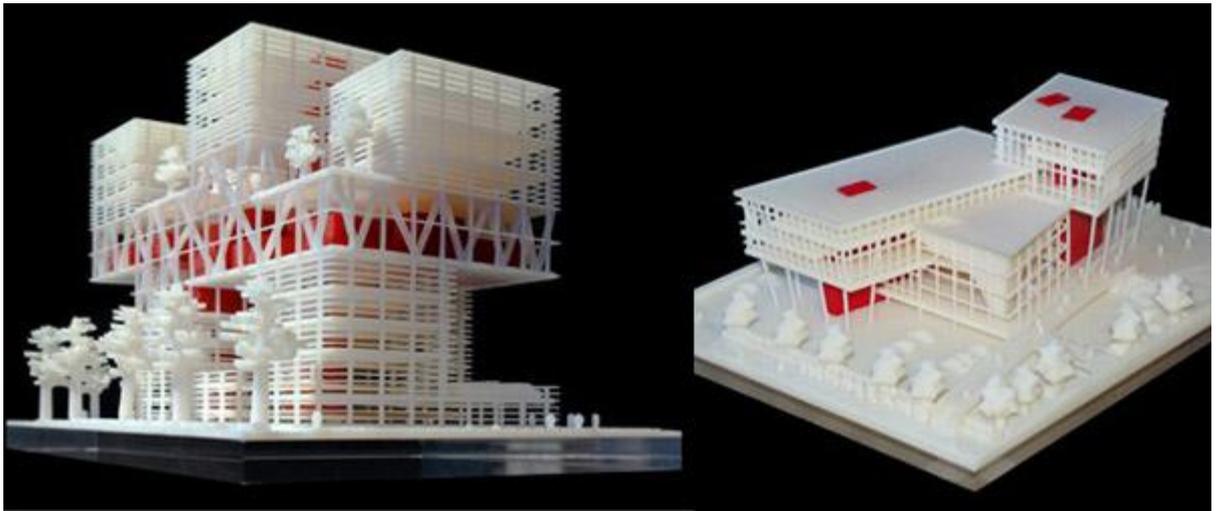


Figure III.50 : maquette impression 3D (source : <http://arketyp3d.com>)

III.2.3. Supports d'assistance exploitant les modèles numériques

III.2.3.1. La Simulation de l'éclairage naturel :

La notion de simulation fait partie intégrante de la conception architecturale depuis sa création. Il est donc naturel et même indispensable de l'intégrer dans la CAAO pour poursuivre cette logique de simulation. Cette intégration demande l'interprétation des intentions géométriques du concepteur sous la forme d'une maquette numérique. C'est à partir de cette maquette que l'on effectue les simulations de phénomènes physiques. De plus, elle ouvre la voie à d'autres utilisations comme la communication, la représentation ou l'intégration dans un système d'information géographique. La palette de simulations est très étendue et regroupe l'ensemble des phénomènes physiques (lumineux, acoustique, thermique, aéraulique, etc.) (Tourre, 2007).

« Nous définissons la simulation comme le processus capable de reproduire les interactions entre un ou plusieurs phénomènes physiques et les formes construites, via un modèle de ces

phénomènes. Le modèle peut être simpliste ou sophistiqué ; l'essentiel est que le processus puisse reproduire avec fidélité les interactions formes / phénomènes » (Siret, 1997)

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 (Miguet, 2000).

III.2.3.1.1. Simulation photoréaliste

Pour avoir une vue générale de l'ambiance lumineuse, la simulation de la lumière est associée à un modèle photoréaliste. En architecture, la simulation **photoréaliste** est destinée à la présentation des projets (concours, concertation publique, etc.). Elle est généralement très valorisante mais parfois peu en rapport avec la réalité de la scène. Les principaux outils comme RADIANCE, Genelux, Dial-EUROPE et LightScape sont détaillés dans un état de l'art de Roy (Roy, 2000). Malgré des lacunes en compatibilité et en interface homme-machine, l'auteur retient RADIANCE qui réunit les meilleures performances techniques et la meilleure qualité de simulation physique (Tourre, 2007).

III.2.3.1.2. Simulation photométrique

La simulation photométrique est utilisée pour analyser une scène, et est axée sur l'exactitude du phénomène. L'interprétation des résultats de ces simulations reste difficile. Elle permet une simulation photoréaliste fidèle au prix d'un très long temps de calcul (Tourre, 2007).

Les applications de simulation photométrique sont nettement moins développées que les précédentes car le résultat obtenu n'est pas directement exploitable mais il doit être interprété. En revanche, la précision des modèles photométriques est supérieure aux modèles photoréalistes. Ils peuvent intégrer un spectre de radiation plus large et donc donner des résultats en thermique et en éclairage (High Dynamic Range Definition). Dans le cas des simulations photométriques, c'est généralement un bureau d'études qui fait la simulation afin d'en faire une interprétation. Nous notons qu'il y a alors un accroissement de la distance entre le concepteur et l'ambiance photométrique. Il existe un fossé entre les outils de conception et les outils de simulation, ce qui rend difficile le cycle essai-correction (Tourre, 2007).

III.2.3.2. Algorithmes de calcul de l'éclairage naturel

Les algorithmes utilisés dans les logiciels de simulation de l'éclairage sont des algorithmes dits d'éclairage global (global illumination) puisqu'ils font un calcul tridimensionnel de

la propagation de la lumière. Le rôle des algorithmes dans une simulation d'éclairage est de gérer le calcul de la propagation de la lumière entre les sources et les surfaces d'une géométrie, puis les interréflexions entre ces surfaces (Maamari, 2011). Les algorithmes les plus répandus utilisent la technique de radiosité ou du lancer de rayon. D'autres se basent sur la split flux formula. Il existe également des algorithmes combinés comme le photon mapping, par exemple (Mitanchey, 1996).

III.2.3.2.1. Split flux formula

Le premier algorithme, split flux formula, se base sur une méthode de calcul établie par le BRE (Building Research Establishment) initialement pour un calcul manuel. Cette méthode part du principe que l'éclairage global en un point défini résulte de trois composantes distinctes : la composante directe (sky component ou SC), la composante des réflexions sur les surfaces extérieures (externallyreflected component ou ERC) et la composante des réflexions sur les surfaces intérieures (internallyreflected component ou IRC). Chacune de ces composantes est calculée séparément. Elles sont ensuite additionnées pour obtenir l'éclairage global pour chaque point identifié (Maamari, 2004).

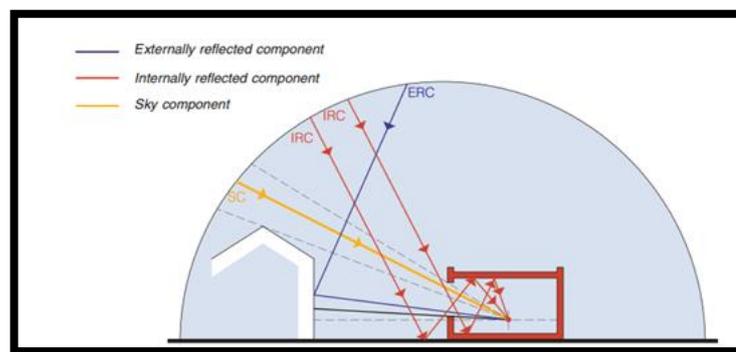


Figure III.51: Composante de Split flux formula

III.2.3.1.2. Radiosité ou radiosity

Les algorithmes de radiosité se basent sur une méthode de simulation par éléments finis développée à l'origine pour l'étude des transferts thermiques et fondée sur la loi de la conservation de l'énergie. Cette méthode implique la discrétisation par un maillage de toutes les surfaces d'une scène en surfaces élémentaires ou 'facettes'. Le bilan des flux de rayonnement émis et reçus depuis toutes les surfaces visibles dans l'environnement est établi pour chaque surface élémentaire. L'éclairage de chaque point du maillage est déterminé en additionnant les flux lumineux reçus depuis toutes les surfaces environnantes et la lumière  mise par la surface élémentaire. Le pas ou la finesse du maillage est évidemment un facteur

qui influence considérablement la précision des simulations. Les logiciels les plus avancés intègrent un module qui affine automatiquement le maillage autour des discontinuités pour optimiser les résultats (Deroisy, 2011).

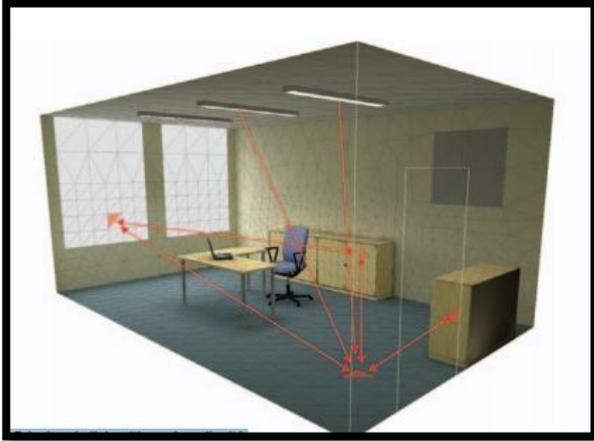


Figure III.52: Principe de l'algorithme de radiosité. (Source : CSTC, 2011)

III.2.3.1.3. Lancé de rayons

Les algorithmes de lancer de rayon se basent sur une méthode de calcul des trajectoires d'un nombre important de rayons lumineux dans une scène. Chaque rayon interagit par réflexions, transmissions ou réfractions avec les différentes surfaces du modèle. Deux approches sont possibles :

- le rayon est suivi depuis la source de lumière jusqu'à ce qu'il atteigne le point d'observation ou qu'il soit atténué (forward raytracing ou lancer de rayon direct).
- le rayon de lumière est tracé depuis le point d'observation et suivi jusqu'à ce qu'il atteigne une source de lumière (backward raytracing ou lancer de rayon inverse). Le lancer de rayon inverse offre l'avantage de réduire le nombre de rayons à tracer puisque seuls ceux qui atteignent le point d'observation sont calculés. Par conséquent, un nombre limité des rayons de lumière réfléchis de manière diffuse entre les surfaces du modèle est calculé. Ainsi, en fonction des paramétrages utilisés, ces interrélaxions diffuses (composantes indirectes) ne sont pas toujours évaluées avec autant de précision (Deroisy, 2011).

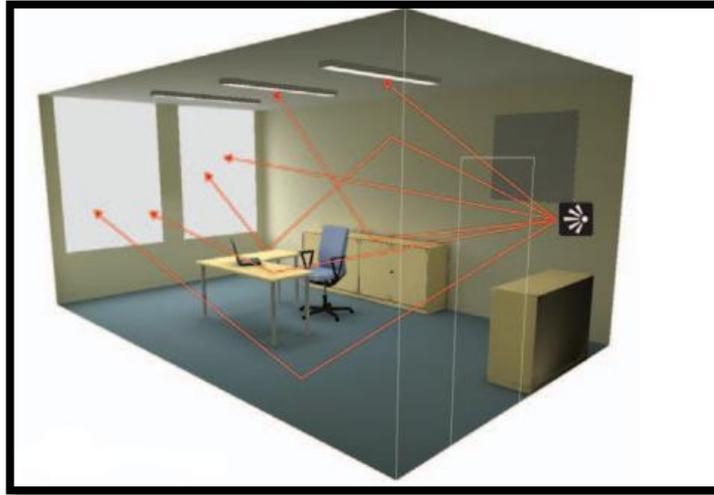


Figure III.53 : Principe de la méthode du lancer (Source : CSTC, 2011)

La méthode du lancer de rayons donne des résultats corrects avec des réflexions de type spéculaire (énergie retransmise essentiellement dans la direction de réflexion) mais ne permet pas de prendre en compte des réflexions de nature diffuse (énergie retransmise depuis la surface dans toutes les directions). Pour tenir compte de toutes les contributions lumineuses oubliées, le lancer de rayons ajoute un terme nommé "intensité ambiante" qui n'existe pas physiquement (Didieu, 1998).

Dans la réalité, les environnements sont composés de surfaces diffuses tels les murs, les tapis etc... C'est pourquoi le rendu en lancer de rayons peut être décevant pour ce type de surfaces. En réalité, les objets ne sont pas seulement illuminés par des sources de lumière, mais aussi par les lumières émises par les autres surfaces de la scène. Pour résumer, la technique de radiosité permet de traiter la réflexion diffuse, difficile à mettre en œuvre en lancer de rayons. En contrepartie, la radiosité classique sera incapable de travailler avec des surfaces spéculaires (des miroirs par exemple), et est généralement plus coûteuse (Didieu, 1998)²⁶.

III.2.3.1.4. Photon mapping

Les développements les plus récents en matière de logiciels informatiques tentent d'atténuer les avantages de chaque méthode de simulation en utilisant des algorithmes combinés. Les algorithmes utilisant la technique du photon mapping sont des méthodes de simulation optimisées qui réalisent le calcul en deux phases. Un lancer de rayon direct combiné à une structure de stockage des données (photon map) est utilisé lors de la première étape. La

²⁶ <http://dedieu.chez.com/index.html>

seconde étape consiste en un lancer de rayon inverse. Un photon map est comme une cartographie mémorisant l'apport de lumière de premier ordre reçu par toutes les surfaces d'un espace et sert à affiner la prise en compte des multiples interrélaxions de lumière dans une scène lors de la seconde étape du calcul. Cette méthode, en fonction des paramétrages utilisés ainsi que du type configuration, donne généralement les résultats les plus satisfaisants. Elle permet également de calculer et de visualiser des effets optiques complexes tels que la réfraction par des surfaces courbes ou la diffusion à travers des matériaux translucides minces. Le photon mapping, comme d'autres méthodes de simulations combinées, est un moyen d'évaluer l'éclairage naturel dans un espace avec un bon degré de précision et dans un temps de calcul raisonnable (Deroisy, 2011).

III.3. l'évaluation de l'éclairage naturel par simulations informatiques

Vu l'impossibilité d'enquêter sur tous les logiciels existants dans le marché de l'informatique, nous nous contenterons durant cette partie du chapitre de citer quelques-uns sur lesquels il y a eu des publications scientifiques et des travaux de validation. On essaye de classer ces logiciels en deux catégories, la première regroupe des logiciels de simulation à base de modélisation géométrique, et les logiciels de la deuxième catégorie sont des logiciels de simulation à base d'image. Les outils de la première catégorie sont classés selon le niveau de précision demandé, la complexité et la précision des résultats fournis. A ce sujet, l'ouvrage « daylight in building » de l'International Energy Agency distingue les outils avancés à environnement intégré et les outils simples (Chaabouni ,2011).

III.3.1. Logiciel de simulation à base de modélisation géométrique

III.3.1.1 Les outils avancés à environnement intégré :

C'est l'ensemble des logiciels permettant une modélisation précise et détaillée du projet et une simulation pouvant prendre en compte toute la complexité de la géométrie et des matériaux du bâtiment à construire (Chaabouni ,2011). Ces outils offrent l'avantage d'une analyse complète de la stratégie de la lumière naturelle modélisée et fournissent ainsi des informations importantes concernant :

- la visualisation de la distribution de la lumière naturelle,
- la visualisation du comportement dynamique de la lumière naturelle,
- la détermination des quantités de lumière,

- le contrôle de la pénétration de la lumière directe,
- le comportement dynamique des ombres,
- l'identification de la présence d'un éblouissement éventuel et l'évaluation des indices du confort visuel.

Les résultats se présentent sous forme de carte de luminances, de tableau de valeurs ou encore sous forme d'images de synthèse qui permettent d'avoir des résultats offrant une meilleure perception de l'espace modélisé avec des impressions visuelles très réalistes. Ceci permet à un utilisateur de vérifier et d'analyser plus facilement les résultats. Cependant, ces outils demandent un temps de calculs relativement long. Pour avoir une idée sur le fonctionnement des outils appartenant à cette première famille, sur les principes adoptés ainsi que sur la nature des résultats obtenus, nous allons présenter ceux les plus utilisés dans les domaines de la recherche et de l'aide à la conception de l'éclairage naturel. Pour avoir une idée sur le fonctionnement de ces outils, sur les principes adoptés ainsi que sur la nature des résultats obtenus, nous allons présenter : Lightscape3.2, Phanie, DAYSIM, ECOTECT, RADIANCE, EVALGLARE, Le plug-in Diva-for-Rhino, Le plug-in Honeybee-for-Rhino.

III.3.1.1.1. Lightscape3.2

C'est un logiciel qui est destiné à des utilisations graphiques (site internet)²⁷, mais il offre également des fonctionnalités intéressantes pour la simulation physique de la lumière. Il utilise un algorithme de radiativité pour le calcul quantitatif, et un algorithme de lancer de rayons pour l'amélioration qualitative et visuelle des images de synthèses (Maamari, 2002). En effet, pour la simulation lumineuse, LIGHTSCAPE²⁸ ne considère que les trois types de ciel normalisés : clair, uniforme (partiellement nuageux) et couvert, sans tenir compte des états intermédiaires. Les autres données climatiques prises dans les calculs, se limitent aux coordonnées géographiques du lieu, à la date et à l'heure de l'opération (Karoui, 2012). La recherche menée par Fawaz Maamari a montré les limites de LIGHTSCAPE pour simuler la transmission directionnelle des vitrages, faussant ainsi les résultats (Karoui, 2012).

²⁷Lightscape 3.2 disponible sur le lien suivant <http://www.lightscape.com/>

²⁸<http://www.3dv.com/3dsoftware/lightscape/>

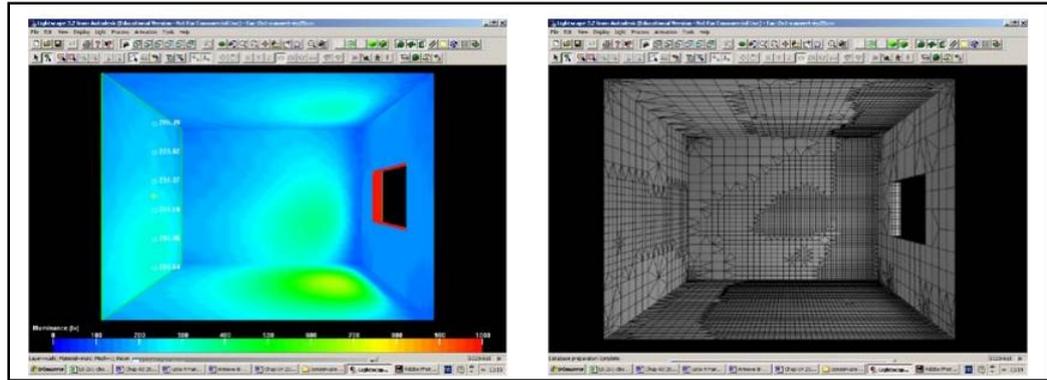


Figure III.54 : Affichage des résultats en pseudo-couleur ou en normal avec le maillage adaptatif de radiosité (source : Maamari, 2002)

III.3.1.1.2 ECOTECT:

Développé par Autodesk. ECOTECT permet une analyse lumineuse des espaces architecturaux et des ensembles urbains, à travers l'évaluation du facteur de lumière du jour, du niveau d'éclairage et des rayonnements solaires incidents sur les surfaces, vitrées et opaques.

Il est compatible avec d'autres outils plus performants comme RADIANCE dans le domaine lumineux et solaire, et EnergyPlus dans le domaine thermique. Les fonctions du logiciel sont multiples dont celles relatives à la modélisation géométrique et à la simulation de la position et de la trajectoire solaire sur le site étudié, à n'importe quelle date et à toute heure de la journée.

Les modalités de calcul restent cependant peu connues, ce qui pose un problème sérieux quant à sa validation. C'est ce qui explique son utilisation, dans les laboratoires de recherche, en association avec RADIANCE, conduisant à de meilleurs résultats, plus fiables (Karaoui, 2012).



Figure III. 55: Simulation lumineuse de la course solaire

(Source : <http://logiciels.i3er.org/ecotect.html>)

III. 3.1.1.3. DAYSIM

Environnement (Plate-forme) : MS Windows et Linux/Unix. Il a été développé sur le même environnement que RADIANCE et est compatible également avec ECOTECT. Le logiciel sert pour l'analyse et la simulation de la lumière du jour en calculant sa disponibilité annuelle dans les bâtiments en fonction des conditions atmosphériques du site d'intervention (niveaux d'éclairement, niveaux de luminance, distribution de l'éclairement à l'intérieur d'un local)(site internet) ²⁹. A cette fin, le programme développé prévoit la possibilité de télécharger et de traiter des fichiers Météo fournis par le logiciel de simulation énergétique des bâtiments : EnergyPlus. Ces fichiers contiennent des données climatiques (rayonnement direct et diffus) et géographiques (lieu, latitude, longitude, altitude, facteur de réflexion du sol) pour plus de 680 villes d'Amérique, du Canada et d'Europe. Les résultats obtenus se présentent sous forme de vues en perspectives et d'images « photo-réalistes », permettant d'évaluer le degré d'autonomie en éclairage naturel du local. En outre, il est possible d'exporter les modèles d'Ecotect directement dans DAYSIM à des fins d'analyse approfondie, et de les importer par la suite dans Ecotect à des fins de présentation (Karaoui, 2012).

²⁹ Simulations dynamiques de la lumière du jour - Institut de Recherche de Construction du Canada (IRC), Conseil National de Recherches Canada (CNRC). <http://www.daysim.com>

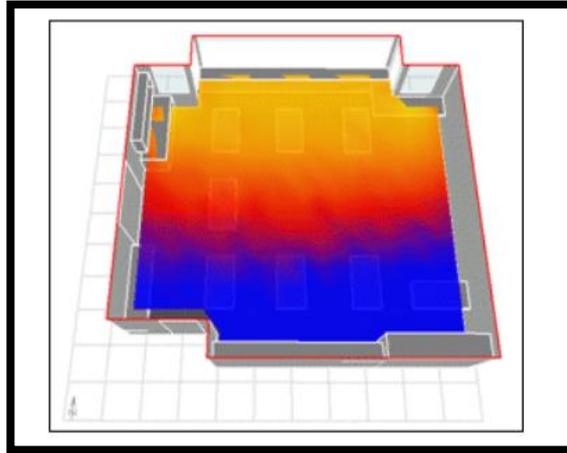


Figure III.56: Distribution de l'éclairage à l'intérieur d'un local
(Source : <http://daysim.ning.com/>)

III.3.1.1.4. RADIANCE

Il est reconnu pour la qualité scientifique et la fiabilité de ses résultats³⁰. Aussi, plusieurs outils spécialisés dans l'évaluation de l'éclairage naturel, comme ECOTECT, DAYSIM et SUPERLITE, ont-ils été développés sur la même plate-forme afin de pouvoir développer des extensions permettant le couplage et la combinaison des résultats. Il utilise un algorithme de lancer inverse de rayons (Karaoui, 2012).

RADIANCE calcule les niveaux de luminance L (en cd/m^2) sur les différentes surfaces de la scène, les niveaux de l'éclairage lumineux E (en lux) et la valeur du facteur de lumière du jour FLJ (en %), en tout point p de l'espace. Les résultats fournis sont représentés sous forme de cartes d'éclairage et de contours d'isoluminance, superposés à un rendu en images de synthèse, pour une restitution réaliste du cas étudié.

³⁰RADIANCE : *Energy-efficient lighting and daylighting strategies in building design* Environnement (Plate-forme) : MS Windows et Unix RADIANCE est l'outil de simulation du Lawrence Berkeley National Laboratory, conçu par Greg Ward et considéré par les spécialistes comme « le plus abouti et le plus utilisé ». RADIANCE est disponible à l'adresse suivante : <http://radsite.lbl.gov/radiance>

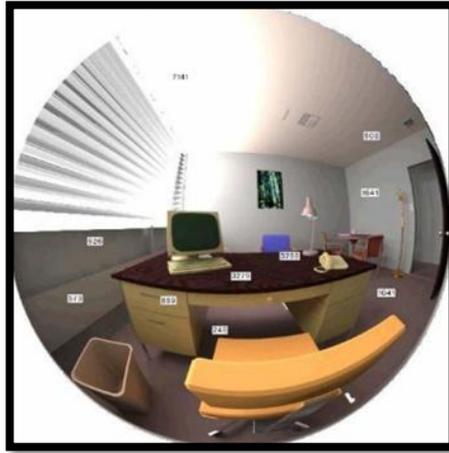


Figure III.57 : Indicateur du niveau d'éclairement (source : F.Miguet 2007)

III.3.1.1.5. PHANIE

C'est un logiciel de simulation physique de l'éclairage (site internet)³¹, capable de traiter des scènes très complexes. Il permet dès la conception d'une salle ou d'un bâtiment, de définir et de visualiser des scénarios lumineux en fonction de multiples paramètres : architecture, sources lumineuses artificielles et naturelles (en liaison avec le climat), nature des matériaux. Il permet également de caractériser quantitativement les ambiances lumineuses, en termes de luminances, d'éclairements ou encore de risques d'éblouissement.

Une méthode de calcul optimisée : la radiosité hiérarchique

- Visualisation photoréaliste et navigation fluide dans les environnements simulés
- Evaluation quantitative de l'éclairage : éclairement, luminance, température de couleur, éblouissement...
- Prise en compte du caractère spectral des propriétés des matériaux (transmission et réflexion)
- Module d'étude de l'ensoleillement : images d'ombres portées et bilan chiffré de l'ensoleillement de façades

³¹ Logiciel de simulation physique de l'éclairage – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, France.
<http://www.cstb.fr/dae/fr/nos-produits-et-formations/outils-de-calcul/phanie.html>

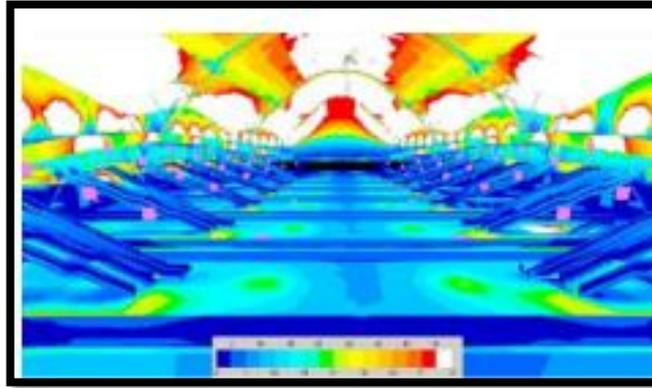


Figure III.58: logiciel Phani Rendu en fausses couleurs de l'éclairage (source : http://www.cstb.fr/dae/fileadmin/user_upload/documents/ECE_PHANIE.pdf)

III.3.1.1.6. Velux Daylight Visualizer

Velux Daylight Visualizer est un outil simple à utiliser qui permet de voir l'apparence qu'aura un espace éclairé par la lumière naturelle. Il permet aussi de calculer certaines valeurs physiques de la lumière naturelle comme les niveaux d'éclairagements, le facteur de lumière du jour et la luminance d'un espace architectural selon l'heure et le jour que le concepteur choisi ou selon une année complète. Vélux, qui a conçu cet outil, a essayé de l'adapter au maximum aux connaissances et aux méthodes de travail des architectes. Des animations sont générées pour montrer l'évolution du comportement de la lumière tout au long de l'année (Cervantès, 2012).

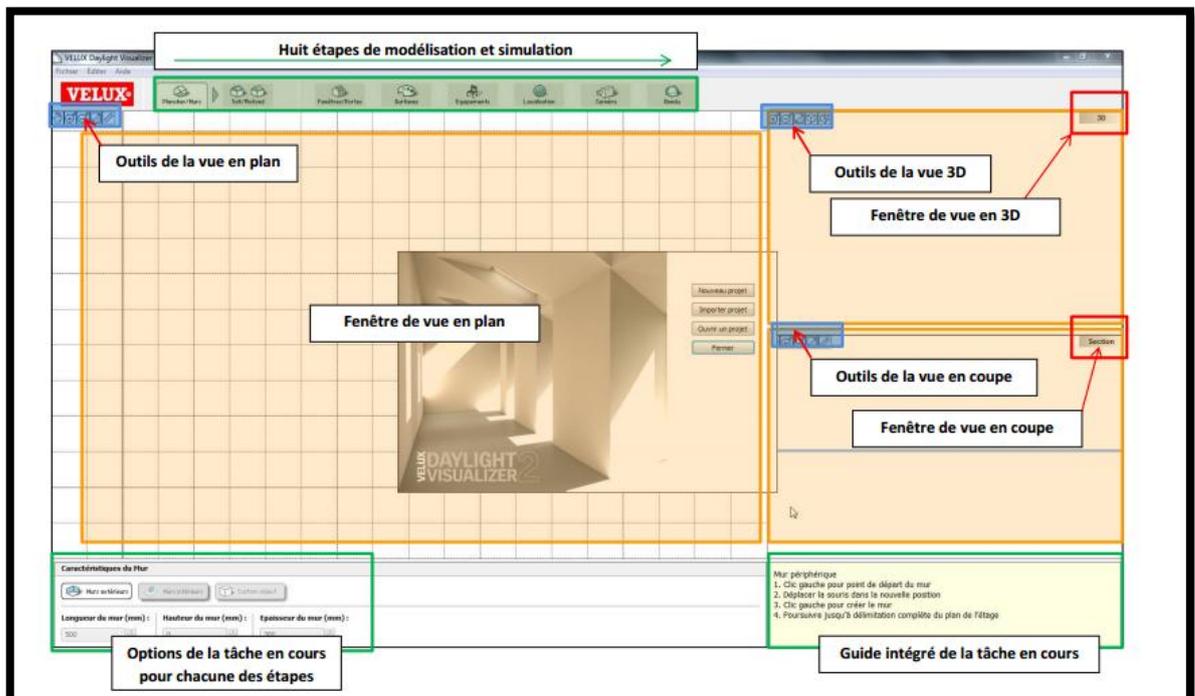


Figure 59 : Interface de VELUX (source : Haubrage & Bodart, 2012)

Le logiciel permet de recréer des espaces simples et fermés grâce à de nombreux modules prédéfinis. Malgré la facilité de description et de modélisation des espaces ainsi que de paramétrage, ce logiciel présente des erreurs de calcul pour les modèles importés d'autres logiciels de modélisation de type Sketchup. La bibliothèque d'éléments comme les fenêtres ou les matériaux est tout de même restreinte (Cervantès, 2012).

III.3.1.1.7. Le plug-in Diva-for-Rhino®

DIVA³² est un plugin pour le logiciel Rhinocéros (modeleur 3D) et Grasshopper. (Éditeur d'algorithmes graphiques). Il permet d'effectuer des simulations de lumière naturelle et d'énergie. Ce logiciel est développé par la Graduate School of Design de l'Université d'Harvard. Il est maintenant exploité par une entreprise créée par des chercheurs, Solemma LLC. Diva pour Rhino permet aux utilisateurs d'évaluer la performance environnementale des bâtiments en réalisant des calculs de facteur de lumière du jour, d'éclairage, d'éblouissement et d'obtenir des rendus photoréalistes. Ces simulations sont réalisées en tenant compte du lieu, du climat ainsi que de la date et de l'heure. DIVA permet aussi d'effectuer des calculs thermiques. Ce plugin est directement intégré au modeleur Rhino.

Ce dernier est un outil de modélisation pour les concepteurs. Il permet d'exécuter différents types de formes géométriques, de travailler avec des maillages, des nuages de points... Il permet à la fois le dessin 2D et 3D. Les fenêtres des vues sont modulables au niveau de leur taille et de leur nombre (en A). Cela permet à l'utilisateur de travailler en plan, en coupe et en 3D de manière quasi simultanée. Il est possible de ne faire apparaître qu'une vue, en perspective par exemple.

Après avoir modélisé sur Rhinocéros un espace, le plugin DIVA permet d'effectuer les diverses simulations. Après installation du plugin, quatre icônes apparaissent en haut à gauche de l'écran (en B).

³² Design Iteratee Valuate Adapt

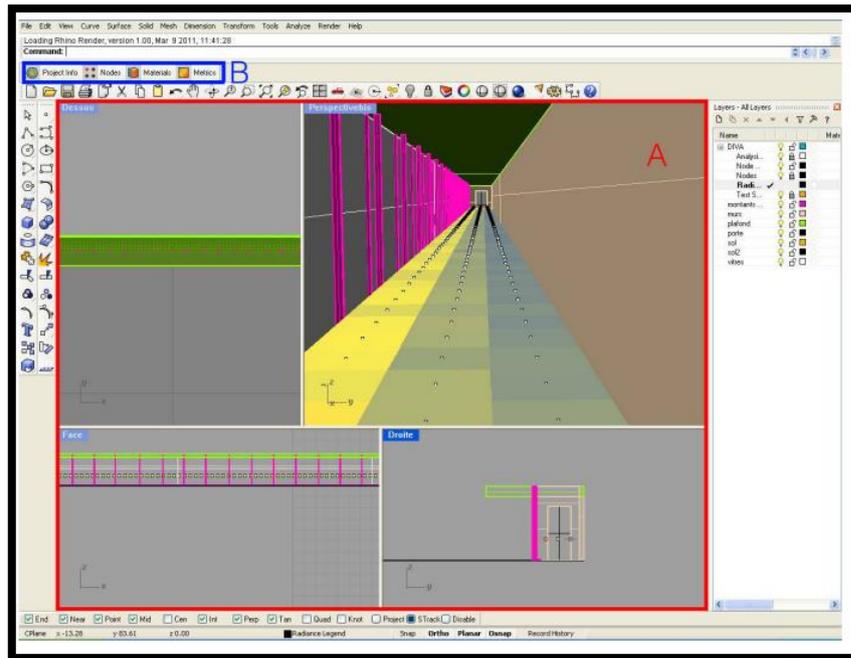
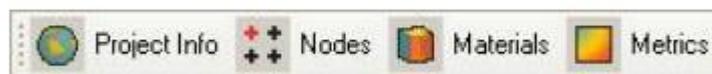


Figure III.60 : Interface de Rhinocéros et du plugin DIVA.



Ces icônes permettent de prendre en compte les données climatiques du lieu du projet (icône « Project Info »), de positionner les nœuds de calculs sur un plan à la hauteur de notre choix et avec des espacements plus ou moins grands (icône « Nodes »). Une icône « matériaux » (icône « Materials ») donne la possibilité à l'utilisateur d'affilier un matériau à chaque calque créé dans Rhino. La liste de matériaux étant assez restreinte, il est possible de modifier les matériaux et d'en créer de nouveaux grâce à un éditeur de texte. La quatrième icône « Metrics » est celle permettant d'effectuer les différents rendus.

Et le même principe pour Le plug-in Honeybee-for-Rhino³³Honey Bee, il relie Grasshopper3D à EnergyPlus, Radiance, Daysim et OpenStudio pour l'évaluation de l'énergie et de l'éclairage naturel.

³³Honeybee est développé par Mostapha SadeghipourRoudsari est distribué sous licence Creative au <https://github.com/mostaphaRoudsari/honeybee> Vous devez avoir installé Ladybug afin d'exécuter honeybee <https://github.com/mostaphaRoudsari/ladybug>

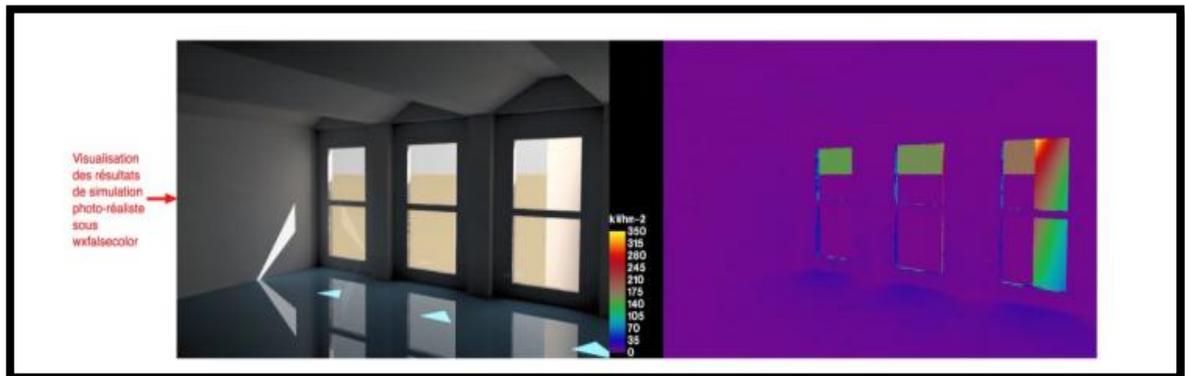
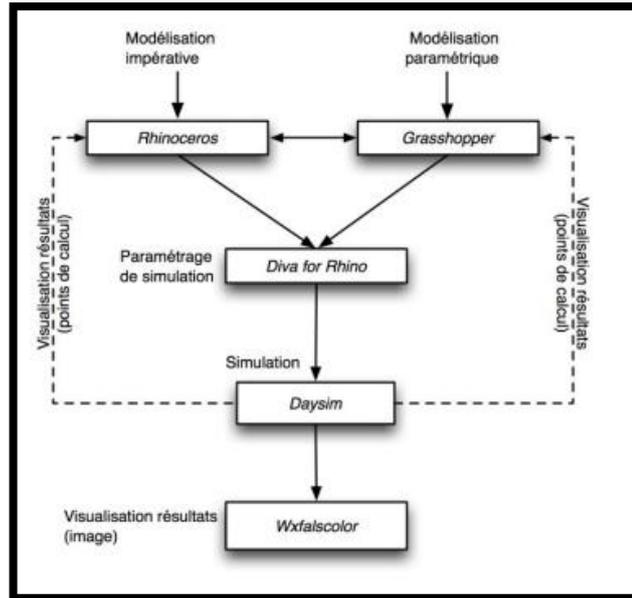
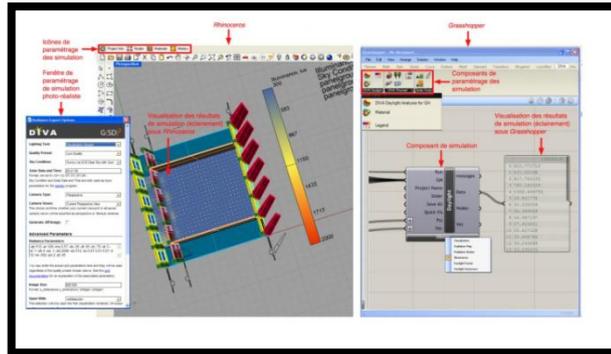


Figure III.61 : Processus de fonctionnement, interface et résultats de Diva-For-Rhino® (plug-in de connexion entre Rhinoceros® / GrassHopper® et Radiance®) (source : Gallas, 2013)

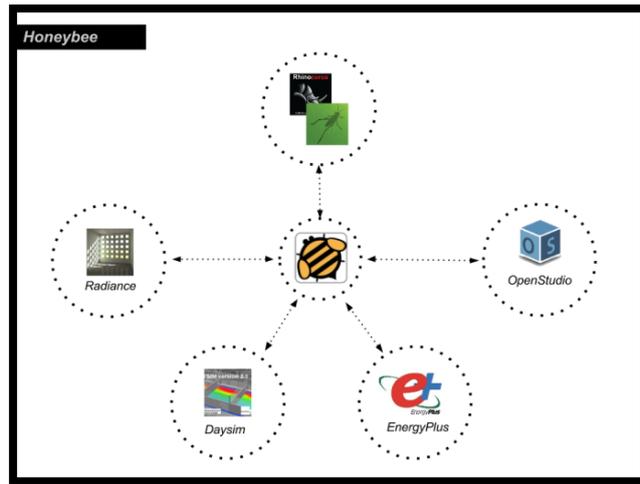


Figure III. 62: Le plug-in Honeybee-for-Rhinosource (source: buildingenergysoftwaretools.com/software/honeybee).

III.3.1.2 Les outils simples :

À la différence des outils avancés, les outils simples ont une utilisation plus intuitive et ont pour objectif d'apporter une aide précoce à la conception dès la phase d'esquisses. Ils présentent un niveau de détail et de précision adapté à cette phase. Ces outils permettent de donner une idée générale sur le comportement de la lumière naturelle (quantités de lumière (FLJ) et sa distribution dans le local simulé) (Chaabouni, 2011).

Les résultats de simulation obtenus sont moins précis que ceux issus des outils avancés. Néanmoins, l'intérêt réside dans le fait que les résultats peuvent être obtenus rapidement. Ceci permet à un concepteur de tester facilement et rapidement plusieurs alternatives et hypothèses et d'accélérer ainsi l'activité de prise de décision pour la formulation des solutions potentielles. Cependant, ces outils laissent moins de liberté quant à la modélisation du projet à simuler. Ils peuvent seulement manipuler des locaux reposant sur une géométrie simple (généralement parallélépipédique) avec, pour la plupart, la possibilité d'intégrer des ouvertures uniquement dans un seul mur (Reinhart et al. '07).

III.3.2.1 DAYLIGHT1-2-3

Daylight 1-2-3 dérive de DAYSIM, logiciel évolué d'analyse de l'éclairage naturel inventé par le CNRC³⁴. Il utilise un algorithme de radiosité pour le calcul. Son but est de donner aux architectes des informations utiles concernant l'utilisation de la lumière de jour dans un bâtiment dès la phase de l'avant-projet sous un ciel couvert CIE et calcule le facteur de

³⁴ Eclairage naturel des bâtiments commerciaux R Conseil National de Recherches Canada

lumière du jour, autonomie, éclairement. Est un outil d'analyse conceptuelle d'usage générale ou l'utilisateur doit choisir une typologie d'espace. D'ouverture, donnant ainsi un modèle géométrique type qu'il va personnaliser pour l'adapter à son idée de l'espace. (Gallas, 2013). L'interface ainsi que la typologie de paramètres utilisés sont adaptées à des utilisateurs non spécialistes en matière de simulation, utilisant cet outil pendant les premières phases de conception (site internet)³⁵.

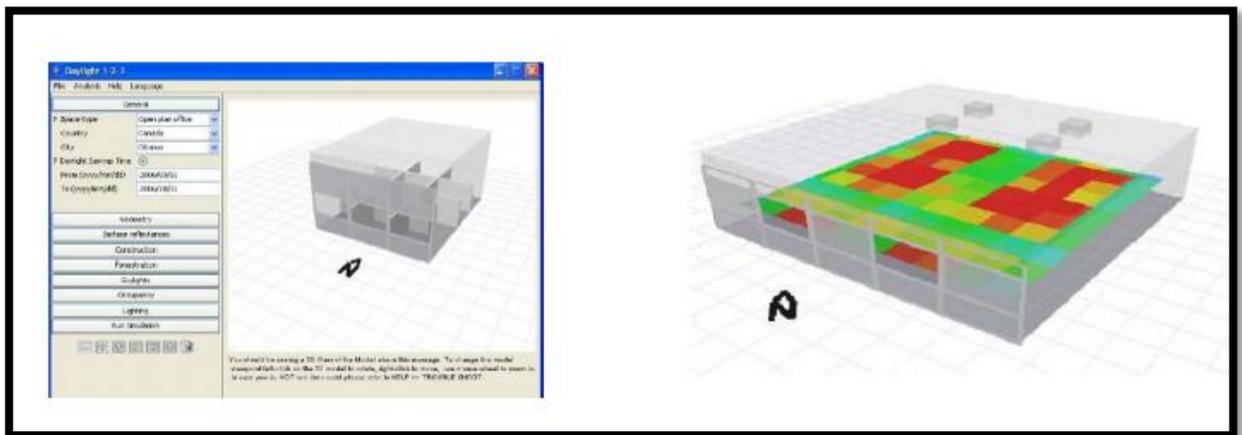


Figure 63 : Le logiciel Dalight 1-2-3 (à gauche l'interface, à droite résultat FLJ) (source : Gallas, 2009)

III.3.2.2. DIAL / Leso-Dial

Financé par l'Office Fédéral de l'Énergie et l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, la conception du logiciel LesoDIAL a débuté en 1995 (Paule et al. 1995).

Le but du logiciel est de donner aux architectes des informations utiles concernant l'utilisation de la lumière de jour dans un bâtiment dès la phase de l'avant-projet à travers un Lexique. Ce dernier contient les principaux termes du vocabulaire de l'éclairage (plus d'une centaine) sont présentés de façon richement illustrée. La finalité de cet outil est de permettre aux concepteurs de tester rapidement les solutions qu'ils envisagent de mettre en œuvre, tant d'un point de vue quantitatif (facteurs de lumière du jour et autonomie en éclairage naturel), qu'en ce qui concerne les aspects qualitatifs liés à l'utilisation de la lumière naturelle (confort visuel, adéquation des protections solaires, etc (Karaoui, 2012).

Il calcule le facteur de lumière du jour sur le plan utile grâce à une utilisation hybride de formule analytique et empirique (Paule, 1995).

³⁵ http://www.bourgogne-batiment-durable.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/DOL-CAD-BBD.pdf

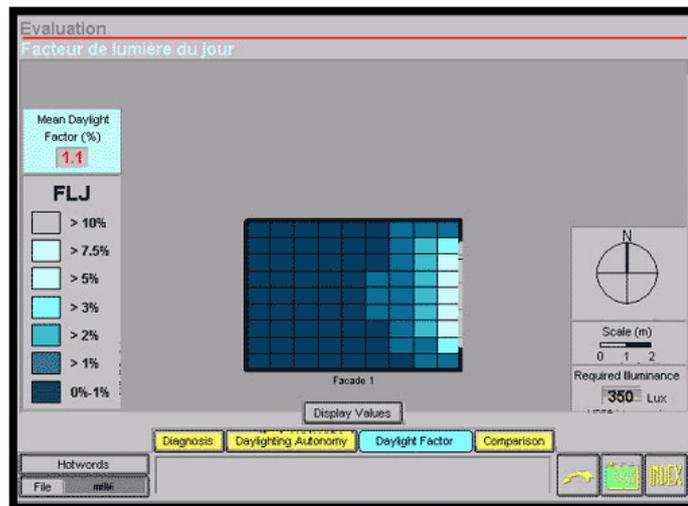


Figure III.64 : LESO DIAL (source : <http://yorset.pagesperso-orange.fr/DD.htm>)

III.3.2.3. DIAL-Europe

Un projet européen "DIAL-Europe" a débuté en 2000, avec pour objectif de rendre LesoDIAL plus "Européen" et d'étendre les capacités d'analyse de ce logiciel. Le but est d'assister le design des ouvertures dès les premières phases du projet et de promouvoir une meilleure performance énergétique et environnementale. Une méthode d'apprentissage II permet à un architecte de faire progresser sa connaissance du domaine, ainsi que son savoir-faire, au fur et à mesure de l'utilisation de l'outil (Estia SA, 2003). Concrètement, le travail se focalisera sur les points suivants :

- Eclairage naturel :
- Calcul de l'autonomie en éclairage naturel pour différents climats européens,
- Prise en compte de la lumière en provenance du soleil,
- Incorporation de systèmes avancés en éclairage naturel.
- Estimation du confort visuel.
- Eclairage artificiel : Implémentation d'algorithmes simplifiés pour l'évaluation des stratégies d'éclairage artificiel, des systèmes de contrôle et d'intégration avec la lumière naturelle.
- Gains solaires / rafraîchissement passif : Implémentation d'un modèle d'analyse énergétique et d'un prédicateur de surchauffe (site internet)³⁶.

³⁶ http://www.buildup.eu/sites/default/files/content/wbk1CD.tmp_.pdf

III.3.2. Logiciel de simulation à base des images

Pour analyser qualitativement une image donnée, il serait souhaitable de connaître certaines grandeurs mesurables et de les associer aux **sémantiques** décrivant la même ambiance, afin d'expliquer l'équilibre ou le déséquilibre d'une ambiance lumineuse à travers des indices tels que le type d'éclairage, dimensions, dégradés et rapports de luminances des plans adjacents qui correspondent à des contrastes (très doux, doux, monotones, dynamiques, ...), types, tailles et dispositions des ouvertures ainsi que les niveaux d'éclairage performants ou non pour la fonction de l'espace (Mudri,1996).

III.3.2.1. EVALGLARE

Développé à l'institut de Fraunhofer pour les systèmes d'énergie solaire à Freiburg (Allemagne) et distribué gratuitement comme projet de recherche européen à Freiburg et à Copenhague (Danemark), **EVALGLARE** est un nouvel outil pour évaluer la lumière du jour afin d'obtenir la DGP et autres métriques d'éblouissement à partir du format d'image Radiance RGBE du type fish-eye; produite avec le logiciel Radiance, et permet également la visualisation des sources de base de contraste pour un éblouissement prévue (Wienold & Reinhart, 2010). **EVALGLARE** peut également être employé pour, calculer la luminance des photographies HDR, avoir des informations sur l'éclairage vertical et déterminer les sources d'éblouissement. Aussi, identifier des sources de luminance basées sur une valeur-seuil, qui peut être :

- manuellement spécifiée par l'utilisateur comme valeur fixe de luminance
- informatique déterminée, basée en moyenne luminance dans le domaine de la vue,
- informatique déterminée, basée sur un utilisateur qui a spécifié l'endroit de tâche.

Noter qu'**EVALGLARE** est toujours dans un statut expérimental. Le programme « **EVALGLARE** » calcule la luminance moyenne des pixels contenus dans une zone de tâche prédéterminée. Chacun des pixels présentant une luminance supérieure à la luminance moyenne de cette zone multipliée par un facteur donné (par défaut ce facteur est de 5), est aussi considérée comme un potentiel d'éblouissement. **EVALGLARE** regroupe ensuite les pixels potentiellement éblouissants qui sont adjacents afin de localiser les sources d'éblouissement. Ces dernières apparaissent avec des couleurs différentes (vert, bleu, jaune,

violet). Il ya aussi d'autre logiciel à titre d'exemple logiciel PHOTOLUX, la simulation en line par WEBHDR...etc



Figure III.65 : EVALGLARE (source: Hirning, 2014)

III.3.2.2. La méthode de Demers (Logiciel AdobePhotoshop©)

Dans le même contexte **DEMERS**³⁷ a proposé une méthode d'analyse et de caractérisation des effets de lumière en partant d'images numérisées de surfaces planes éclairées. Ces images numérisées sont analysées par le logiciel *AdobePhotoshop*© pour séparer leurs pixels en plusieurs niveaux de brillance et qui peuvent donner une évaluation sommaire des intensités de la lumière. Cette recherche se base principalement sur une méthode qui intègre le **contraste** et la **luminosité** afin de permettre un classement lumineux qualitatif et quantitatif de l' image. Ces informations sont obtenues à partir de l'histogramme produit par le logiciel de traitement d'images *AdobePhotoshop*©. L'histogramme présente la distribution des pixels contenus dans une image simplifiée en niveaux de gris (grayscale) sur une échelle segmentée en 256 niveaux de gris.

L'intérêt de cette méthode réside dans la possibilité de quantifier et de qualifier les caractéristiques d'un effet de lumière en partant de données perceptibles non mesurables à savoir, une image (Benfarhat, 2010).

Cette méthode se structure selon les étapes suivantes :

³⁷ Claude Demers Professeure titulaire (Ph.D.) l'université de Laval, Canada

Niveau de détail : Le filtre de tracé des contours³⁸ permet de faire une lecture de l'image, la texture, détails, couleurs, etc. La lecture considère que l'image qui combine un nombre important de lignes de contours produit un haut niveau de contraste lumière –texture. Ce filtre trace la frontière entre les écarts de luminosité, c'est-à-dire les contrastes d'intensité. Il en ressort un dessin aux traits modulés par le contraste lumineux, les formes, les silhouettes et les surfaces des objets. La quantité de détails (le nombre de lignes noires et grises) est aussi un critère de la densité.

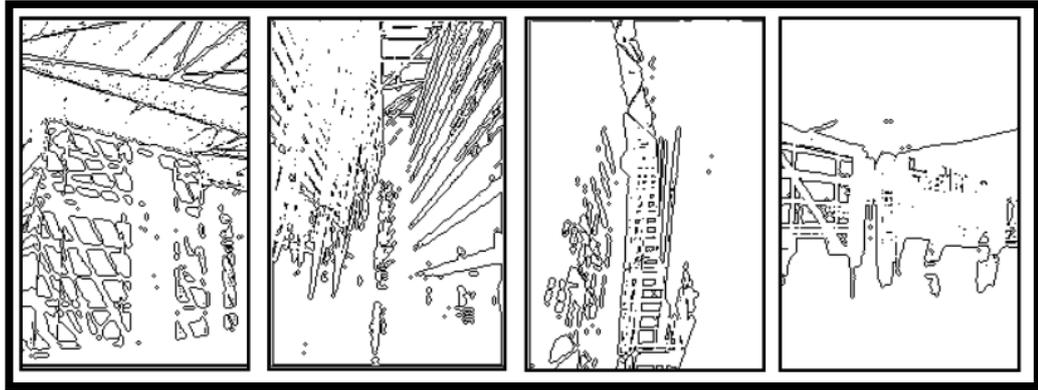


Figure V.66 : Niveau du détail (source : Demers, 2007)

Position du motif dominant : Pour la détermination du motif dominant³⁹, il faut déterminer la localisation des paramètres de brillance qui permettent l'établissement de la relation physique entre l'espace et la lumière. La superposition du niveau de détail et de la position du motif dominant permet de savoir si les zones d'une brillance élevée sont aussi d'attraction élevée.

³⁸ Pour appliquer ce filtre il faut rendre les images au niveau de gris, L'utilisation des images en noir et blanc ne provoquent pas des réactions subjectives par l'œil comme il est le cas du contraste chromatique des images en couleurs (Demers, 2006). Sans aucun traitement par des logiciels, ce qui peut affecter la qualité des images. L'identification des intensités lumineuses les plus élevées sur des images au niveau de gris est plus solide (Biron, 2008).

³⁹ Dans le logiciel PHOTOSHOP, on utilise la commande *stamp*.

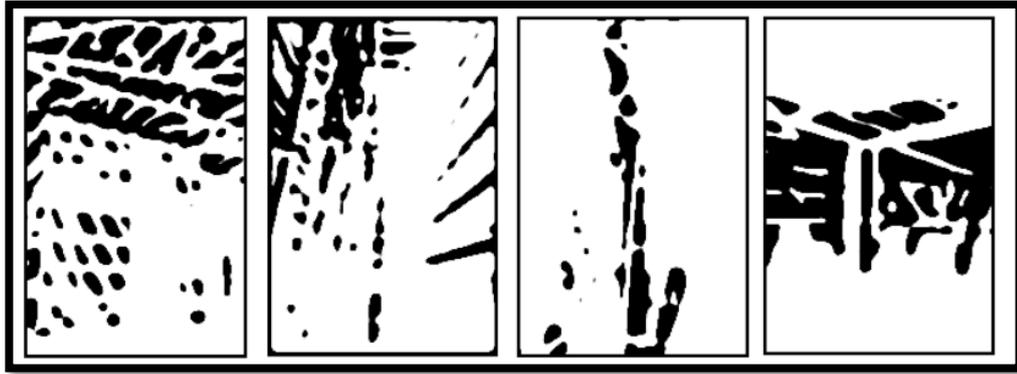


Figure V.67 : Le motif Dominant (source : Demers, 2007)

Graduation de l'image : La séparation en cinq zones de luminosité offre une bonne idée la distribution de la lumière (Demers, 1997). L'*isohélie* engendre un « *pattern* » de lumière servant à décomposer l'image en différentes tonalités de gris sur une échelle de 0 à 255. Du clair à l'obscur, cinq niveaux de graduation ⁴⁰: 0%, 25%, 50%, 75% et 100%. Le 0 représentent les pixels noirs, donc les moins lumineux (l'ombre la plus dense) et 255 représente les pixels blancs, donc les plus lumineux. On peut également lire le pourcentage de luminosité de chaque zone.

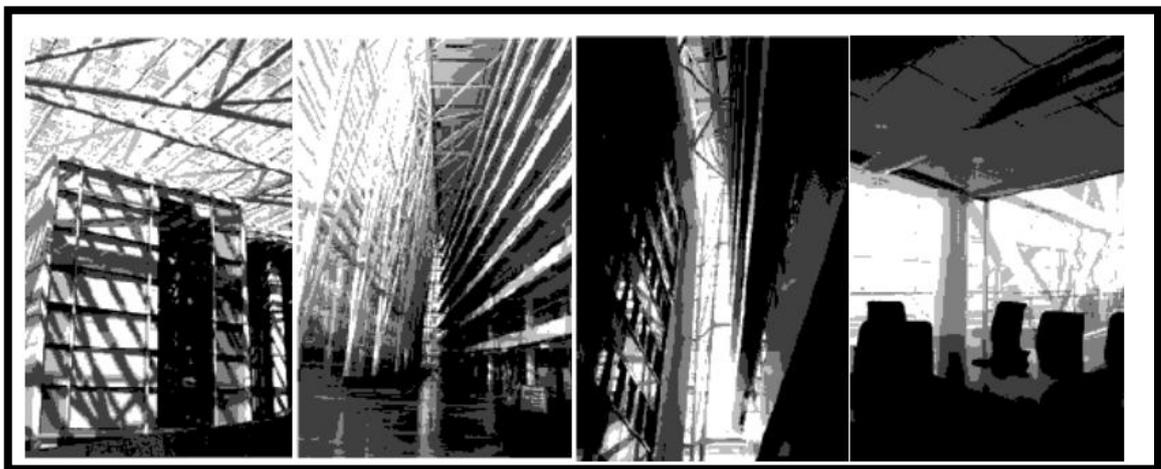


Figure V.68 : Niveau de graduation de la lumière (source : Demers, 2007)

Etude du contraste : Le contraste⁴¹ est considéré dans cette recherche comme indicateur de la qualité et de la quantité de la lumière dans une image. La quantité et la qualité se sont

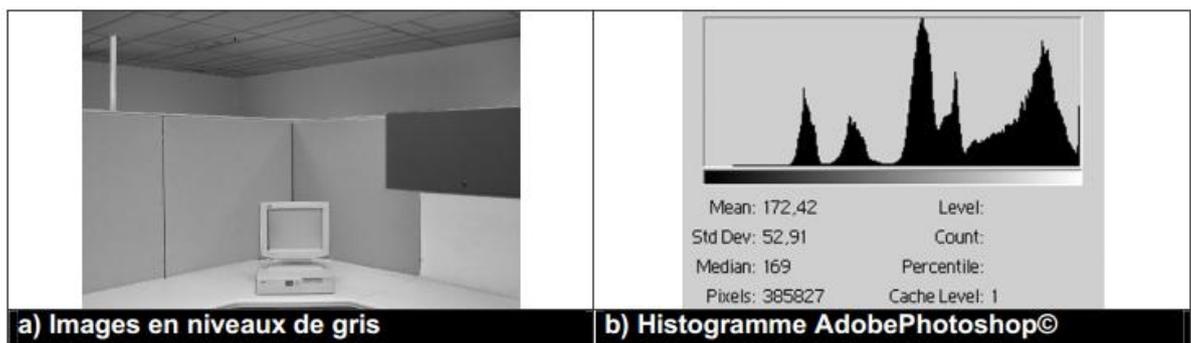
⁴⁰ Pour réaliser cette graduation, on applique la commande : *postérisation*

⁴¹ Utilisant pour cette étude la commande « Brightness » dans le logiciel PHOTOSHOP

deux variables de la lumière (Demers, 2006). Donc le contraste est un indicateur des différentes variables de la lumière. Cette notion est reliée beaucoup plus à la perception visuelle et à la qualité esthétique des espaces architecturaux.

Le tableau montre par exemple une image simplifiée en niveaux de gris (a) et son histogramme. L'abscisse expose les 256 niveaux de gris potentiellement contenus dans l'image, l'ordonnée le nombre de pixels leur étant rattaché. L'histogramme (b) signale un niveau de brillance moyen pour l'image (a) car la majorité des pixels est localisée au centre (valeur de gris 127) ou à l'extrême droite de l'abscisse (valeur de gris 255). Il indique également un faible degré de contraste étant donné la concentration des pixels à prédominance claire (valeurs de gris 127 à 255) et la rareté des pixels foncés (valeurs de gris 0 à 127), absents de l'extrémité gauche de l'histogramme (b).

Tableau V.8 : Image en niveaux de gris (grayscale) et histogramme correspondant. (Source : Dubois, Travail pratique, 2004).



L'analyse quantitative (Demers, 2004) emploie certaines données statistiques fournies par l'histogramme (b) du tableau 8. Ces dernières sont la moyenne (Mean), l'écart type (Std Dev) et le nombre total de pixels (**Pixels**). La première correspond à la valeur de gris moyenne de l'image. Pour être en mesure de la traduire en niveau de brillance (%), la moyenne est divisée par le nombre total de pixels. Elle permet donc de qualifier sommairement une image de « **sombre** », lorsque le pourcentage est faible (0-50%) et de « **claire** » lorsqu'il est élevé (50-100%). L'écart type (Std Dev) indique le degré de contraste global d'une image. Un écart-type élevé équivaut à une image contrastée, les valeurs des pixels étant dispersées de part et d'autre de la valeur gris moyenne (Demers, 1997). Il permet ainsi de qualifier globalement une image de « **faiblement** » ou de « **fortement** » contrastée.

Le niveau de brillance (%) et le degré de contraste global constituent la base de l'analyse quantitative d'images (Demers, 2004). L'axe vertical, relatif au degré de contraste global, signale la valeur de l'écart-type (Std Dev). Les deux images se trouvant dans la partie supérieure du graphique sont donc légèrement plus contrastées que les deux autres en contrebas. L'axe horizontal indique la valeur de gris moyenne des images (Mean). L'échelle 0-100% semble plus évidente pour distinguer la noirceur (0%) de la lumière (100%) par rapport à une échelle répartie sur 256 niveaux de gris. Néanmoins, indépendamment de l'échelle de valeur choisie, l'interprétation des conditions lumineuses visibles sur les photographies demeure la même. Les deux images les plus près de l'origine de la figure sont plus sombres que les deux autres localisées au centre du graphique.

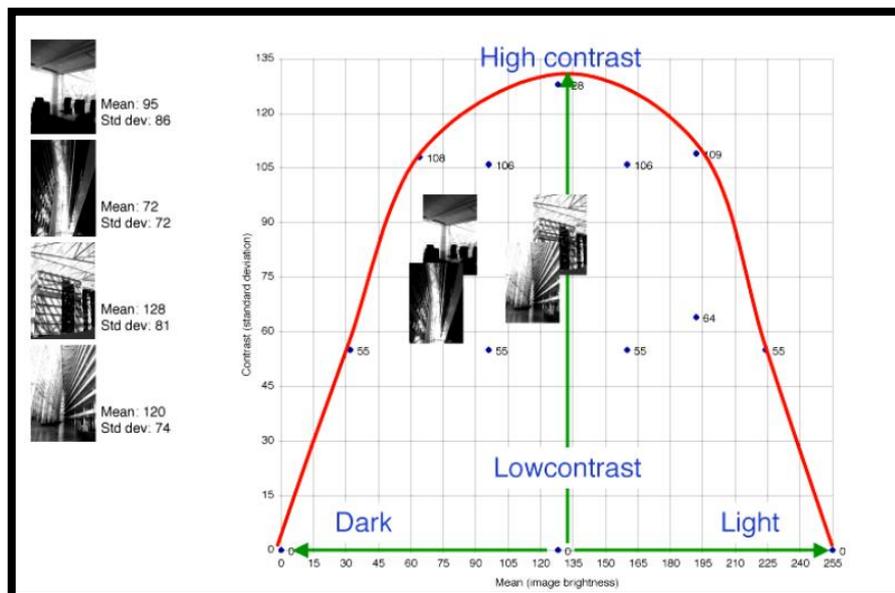


Figure V.69 Classification des images selon leur niveau de brillance et de contraste. (Source : Demers 2004)

Cette étude nous permet de déterminer des aspects d'ordre physiques et perceptuels. Pour le faible contraste, on désigne comme aspects physiques : l'aspect diffus, uniforme ou l'aspect dispersé. En parallèle, et en termes d'aspects perceptuels, on désigne l'aspect d'unité, d'immatérialité ou encore de distraction. Tout de même, pour le cas de haut contraste, on peut désigner l'aspect direct, non uniforme ou concentré comme des aspects physiques, tandis que l'aspect qui présente la fragmentation, la matérialité ou qui attire l'attention font parties des aspects perceptuels.

Tableau III.9 : Echelle du contraste : association des aspects physiques et perceptuels de la lumière (source : Demers, 2006)

	Faible contraste	Contraste moyen	Fort contraste
Aspects physiques	Diffus		Directe
	Uniformité		Non - uniformité
	Dispersion		Concentration
Aspects perceptuels	Unité		Fragmentation
	immatérialité		Matérialité
	Distraction		Attention

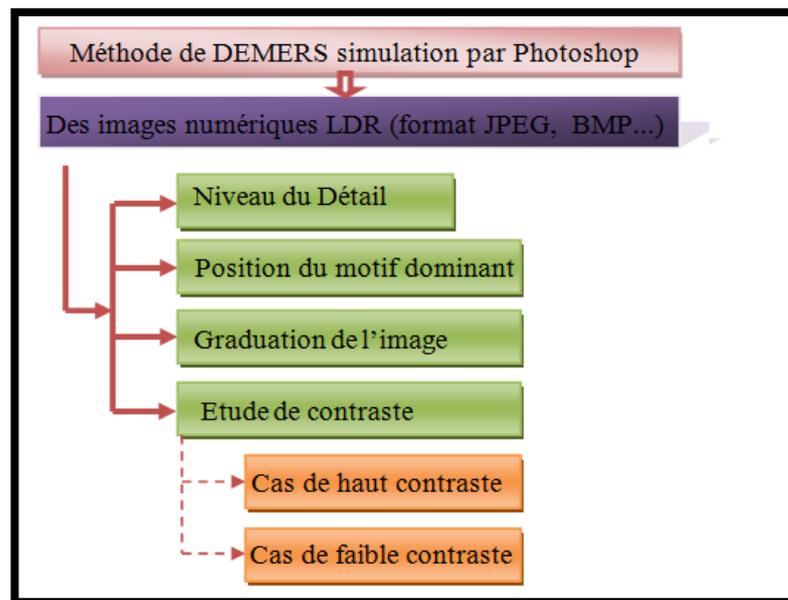


Figure V.70 : la méthode de DEMERS (source : auteur)

Tableau III.10 : récapitulatif de la comparaison entre les logiciels (source : auteur)

Logiciels	Méthode de calcul	Modélisation	Cout	Modèle 3D	Importation Modèle 3D	Eclaircement	Luminance	FLJ	DA	UDA	Visualisation graphiques des résultats
1-Logiciel de simulation à base de modélisation géométrique											
1-1 Les outils avancés à environnement intégré											
Lightscape3.2	La radiosité Lancer de	Des scènes très complexes	€	✓	AutoCAD ® MAX ®	✓	✓	✓			✓
ECOTECT	Split flux formula	Géom : simple Sfce : diffus Maillage : param	€	✓	.dxf, .3ds, .obj	✓		✓			✓
DAYSIM		Géom : complx Sfce : tout Maillage : param	Free		< Ecotect <sketchup	✓	✓	✓	✓	✓	> ECOTECT
RADIANCE	Raytracing extension photon mapping disponible	Géom : complx Sfce : tout Maillage : param	Free		< Ecotect <sketchup	✓	✓	✓			> ECOTECT
PHANIE	La radiosité hiérarchique	Géom : complx Sfce : tout Maillage : param	€	✓		✓	✓	✓			✓
VELUX	Photon mapping	Géom : complx Sfce : diff, spec, Maillage : fixe	Free	✓	.dxf, .dwg, .obj, .skp	✓	✓	✓			✓
Le plug-in Diva-for- Rhino®		Géom : complx Sfce : diff, spec, Maillage : fixe	€		Sketchup Revit Rhino	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1-2 Les outils simples											
DAYLIGHT 1.2.3	Radiosité	Géométries simples	Free	✓				✓			

DIAL/Leso-Dial	d'algorithmes de logique floue (fuzzy-logic) split-flux	Géométries simples Surface diffuses Maillage fixe	€	✓				✓			
DIAL-Europe	Split flux formula	Géométries simples Surface diffuses Maillage fixe	€	✓				✓			
2-Logiciel de simulation à base des images											
EVALGLARE		Photos HDR-	Free			✓	✓				Génération des cartes des luminances
Méthode de DEMERS (Photoshop)		Photos LDR-	Free								IM, ISD

III.4. Synthèse de la comparaison.

A travers cette liste de logiciels de simulation d'éclairage, qui n'a pas pour but d'être exhaustive mais a comme objectif de montrer les tendances du marché et comprendre la logique de leurs fonctionnements. Ces logiciels permettent à partir d'un bâtiment (ouvertures, couleurs, ...) et d'un environnement donnés (ensoleillement, bâtiment voisin, ...) de visualiser la lumière obtenue à l'intérieur du bâtiment. Ils permettent de voir l'apparence

qu'aura un espace éclairé par la lumière naturelle. Il permet aussi de calculer certaines valeurs physiques de la lumière naturelle comme les niveaux d'éclairements, le facteur de lumière du jour et la luminance d'un espace architectural selon l'heure et le jour que le concepteur choisi ou selon une année complète. Qui a conçu cet outil, a essayé de l'adapter au maximum aux connaissances et aux méthodes de travail des architectes. Des animations sont générées pour montrer l'évolution du comportement de la lumière. D'autres logiciels plus complexes mais offrant de nombreuses potentialités comme DIVA-for-Rhino.

Les méthodes de simulation directe de l'éclairage naturel sont nécessaires mais non suffisantes dans le contexte de la conception architecturale (Siret, 1997). Selon Siret les

Limites de toutes les méthodes de simulation directe sont :

- Elles demandent une définition géométrique complète des éléments du projet et de leur environnement,
- Elles n'agissent en conséquence qu'en outil correctif sur des hypothèses architecturales déjà constituées,
- Elles s'inscrivent donc dans un processus itératif de type essai-erreur dont on a montré les limites dans le cadre de la conception

La méthode directe est actuellement utilisée en boucle d'essais-tests : on conçoit une architecture, on constate que la lumière n'est pas conforme aux attentes et on raffine l'architecture jusqu'à obtenir le résultat souhaité. Ces outils de simulation directe ne remplissent pas leur rôle dans la conception des ambiances puisqu'ils ne participent pas à la mise en forme du projet. Ils interviennent comme outils d'évaluation et n'offrent que des solutions correctives sur le projet, lorsque les intentions initiales s'avèrent peu ou pas réalisées au vu des résultats des simulations (Siret, 1997).

Pour permettre l’intégration des ambiances dans le projet, il devient nécessaire d’envisager la mise en œuvre d’outils de simulation inverse (Tourre, 2007). (Le but de notre chapitre suivant)

Tableau III.11 : Synthèse de la comparaison

Nature	Support d’assistance		Exemple
Supports d’assistance exploitant les références	Les documents de références		Les dix livres de Vitruve
	Les outils d’exploration des références		Day@mbiance
	Les manuelles techniques		Neufert
	Les abaques de représentation et de calcul		Maquette d’étude, imprimantes 3D
Supports d’assistance exploitant les modèles physique	Maquette		Sky dome
	Héliondon - ciel artificiel		
Supports d’assistance exploitant les modèles (simulation directe)	1-Logiciel de simulation à base de modélisation géométrique	1.1 Les outils avancés à environnement intégré	1. Lightscape3.2
			2. ECOTECT
			3. DAYSIM
			4. RADIANCE
			5. PHANIE
			6. VELUX
			7. Le plug-in Diva-for-Rhino
	2-Logiciel de simulation à base des images	1-2 Les outils simples	1. DAYLIGHT 1.2.3
2. DIAL/Leso-Dial			
3. DIAL-Europe			
		EVALGLARE	
		Méthode de DEMERS (Photoshop)	

III. CONCLUSION

La conception architecturale est un processus complexe qui dépend de la disponibilité des informations concernant la tâche de conception à réaliser. Elle constitue la mission principale de tout architecte. Le processus de conception architecturale est un processus créatif qui se base sur l’itération où les concepteurs essayent d’atténuer la contradiction entre le manque d’information et l’importance des décisions à travers la représentation. Ils utilisent différents types de représentations pour formaliser leurs idées, les évaluer et les comparer avec les contraintes de conception (Gallas, 2013).

La prise en compte de la lumière naturelle dans la conception architecturale est un phénomène complexe qui fait appel à plusieurs types d’informations en rapport avec le projet d’architecture. Les architectes font appel aux multitudes d’outils pour la prise en compte de

la lumière naturelle dans la conception. Parmi ces outils qui exploitent **les références**, ils se présentent sous différentes formes : des bases de données qui collectent un grand nombre de projets de référence, ou des outils basés sur la typologie, ou encore des outils qui proposent de travailler à partir des photographies de projets. Et une deuxième famille utilise **des modèles physiques**. La construction d'une maquette peut être une solution très intéressante pour ce genre d'étude ces modèles offrent aux concepteurs une aide et une assistance à la maîtrise de la lumière qui peut accompagner le projet dès ses premières phases. Une troisième famille fait appel à des **modèles numériques**, Ce nouveau mode de travail est le résultat du développement des outils numériques et de leur adaptation à la pratique architecturale.

La notion de simulation occupe une place non négligeable dans le processus de conception architecturale. La simulation graphique est en effet utilisée lors de l'esquisse pour rechercher des solutions architecturales. La simulation de l'éclairage a donc toute sa légitimité dans ce processus, en tant que méthode d'aide à la conception (Tourre, 2007).

Les outils de simulation numériques donnent la possibilité d'évaluer, avant la construction du projet, la quantité et la qualité de la lumière naturelle qui sera disponible dans les espaces projetés. Le but est de tester différents aspects en relation avec le projet comme les configurations architecturales, les dispositifs d'éclairage et les propriétés des matériaux. Ensuite, il faut évaluer les résultats obtenus et les comparer aux contraintes de conception afin d'apporter des changements et des ajustements pouvant améliorer la qualité et le rendement lumineux des espaces à concevoir. Ces modèles numériques peuvent être transformés, remodelés et corrigés à tout moment. Ils permettent au concepteur d'entreprendre des modifications et des corrections d'une manière plus facile et plus rapide que sur les modèles physiques favorisant ainsi leur utilisation dans le cadre de projet de conception (Gallas, 2013).

Les méthodes de simulation directe de l'éclairage naturel sont nécessaires mais non suffisantes dans le contexte de la conception architecturale. Ces outils de simulation directe ne remplissent pas leur rôle dans la conception des ambiances puisqu'ils ne participent pas à la mise en forme du projet. Ils interviennent comme outils d'évaluation et n'offrent que des solutions correctives sur le projet.

CHAPITRE IV : L'APPROCHE INVERSE

« On ne résout pas un problème avec les modes de pensée qui l'ont engendré. »

Albert Einstein

VI. INTRODUCTION

L'aide numérique de la simulation de l'éclairage à la conception prend une grande place dans le processus de conception architecturale, elle permet d'anticiper la distribution lumineuse à partir de la définition d'un volume, et de la comparer à l'intention d'ambiance. Grâce à une succession de simulations lumineuses, le concepteur peut travailler sur les volumes ou les matériaux, et apprécier leur impact sur l'éclairage. Ces éléments, qui sont les leviers permettant de maîtriser l'éclairage, n'en restent pas moins des intermédiaires entre le concepteur et l'ambiance lumineuse (Tourre, 2007).

Le plus souvent, un architecte procède selon cette démarche directe. Elle consiste à procéder par tâtonnements et tentatives de formalisation que l'on compare aux intentions initiales. Cette démarche implique une vision du processus de conception de type essai/erreur. Ce procédé n'est pas des plus efficaces, en effet une démarche itérative n'est pas une garantie de satisfaction et la longueur du processus peut s'avérer très élevée. Or dans un contexte de projet, le temps représente un facteur important qui influe principalement sur le coût de l'opération.

Dès lors, ces outils de simulation directe ne remplissent pas leur rôle dans la conception des ambiances puisqu'ils ne participent pas à la mise en forme du projet. Ils interviennent comme outils d'évaluation et n'offrent que des solutions correctives sur le projet, lorsque les **intentions initiales** s'avèrent peu ou pas réalisées au vu des résultats des simulations (Siret, 1997). Pour permettre l'intégration des ambiances dans le projet, il devient nécessaire d'envisager la mise en œuvre d'outils de simulation inverse (Siret, 1997).

Dans cette optique nous essayons dans ce chapitre d'étudier cette approche inverse. Pour mieux comprendre les techniques de simulation inverse de l'éclairage, il nous a paru intéressant en premier lieu de bien définir quelques termes en relation avec cette approche et de comprendre la philosophie de l'approche. Et en deuxième lieu faire un état de l'art de différents logiciels de simulation inverse pour mieux comprendre leurs étapes.

IV.1. La philosophie de l'approche inverse

La modélisation inverse s'inscrit dans une approche plus générale appelée modélisation déclarative (Lucas 1991, cité par Hegron) qui se donne pour objectif de modéliser des objets à partir de la donnée de leurs propriétés indépendamment des modèles numériques qui les régissent. Dans la démarche inverse, on détermine **les conditions** que doivent remplir les **formes** pour réaliser **les intentions**. Dirigée par le résultat, ce procédé est d'avantage en accord avec le processus de conception en architecture au sens général de processus dynamique de formulation/résolution simultanées d'un problème implicite, jamais posé ni jamais résolu définitivement (Perrin, 2004).

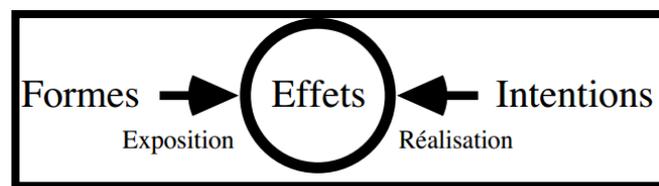


Figure IV.71 : La notion intermédiaire d'effet (source : Siret, 1997)

Les formes-causes produisent des effets intentions (**problème direct**)

Les intentions-effets produisent des causes formes (**problème inverse**).

L'effet est **un médiateur** qui permet, dans le projet, de confronter les formes et les intentions. L'effet n'est ni une forme ni une intention, ni un objet ni un discours. Il représente une interprétation des unes relativement aux autres dans les divers registres du projet (usage, construction, plastique, ambiances, etc.).

L'effet permet donc :

- d'interpréter les formes du point de vue des intentions ; les formes produisent alors différents effets dont certains seront exposés et confrontés aux intentions courantes (effet esthétique d'une forme, effet de la disposition d'une paroi sur la stabilité de la structure, etc.),
- d'interpréter les intentions du point de vue des formes : pour réaliser une intention, il est nécessaire de définir un effet, ou un ensemble d'effets, qui induisent des formes (les intentions constructives, d'usages, etc. prennent « forme » par des effets) (Siret, 1997).

Les formes représentent les « **solutions** » du projet, c'est-à-dire l'ensemble des spécifications de l'objet architectural à construire ; elles regroupent les caractéristiques

matérielles, constructives, plastiques, d'usage... du projet dans son contexte, sans distinction dans ces catégories ;

Les intentions représentent l'« énoncé » du projet, c'est-à-dire l'ensemble des spécifications qui conduisent à la résolution du problème ; elles regroupent les propriétés du site, les contraintes / normes, les références et l'imaginaire du concepteur, sans plus de distinction dans ces catégories (Siret, 1997). Selon Gérard Hégron « *les intentions du concepteur représentent l'énoncé du problème c'est-à-dire le cahier des charges ou des spécifications de l'objet à créer. Ses intentions ne portent pas directement sur la forme de l'objet à concevoir, mais décrivent ses propriétés intrinsèques et les effets qu'il doit produire.* »

IV.1.1. La modélisation déclarative

La modélisation déclarative propose une alternative à la modélisation géométrique **impérative classique**. Elle représente une voie de recherche récente, proposée en 1989 par M. Lucas, qui donne de la modélisation déclarative la définition suivante :

« L'objectif de la modélisation déclarative de formes est de permettre d'engendrer des formes (ou des ensembles de formes) par la simple donnée d'un ensemble de propriétés ou de caractéristiques. L'ordinateur est chargé d'explorer l'univers des formes potentielles, afin de sélectionner celles correspondantes à la définition donnée. Le concepteur n'a plus qu'à choisir, à l'aide d'outils appropriés, la ou les formes qui lui conviennent » (Gaildrat, 2003).

Une autre définition de la modélisation déclarative a été donnée par (Le Goff 90) :
« La modélisation déclarative repose sur l'idée que nous pouvons appréhender le "monde" autrement que par sa description géométrique : nous pouvons le percevoir par ses propriétés, par ses caractéristiques. C'est-à-dire non pas seulement par l'apparence qu'il nous présente mais par les mécanismes et les contraintes qui font qu'il nous apparaît sous cette forme. Ainsi nous nous plaçons à un plus haut niveau d'abstraction » (Gaildrat, 2003).

« La modélisation déclarative est une opération qui autorise la description d'un objet par ses propriétés et à partir de laquelle des solutions ou un espace de solutions sont dégagés pour ensuite être explorés » (Hégron).

« L'objectif de ce type de modélisation est de permettre la génération de formes par la simple donnée d'un ensemble de propriétés et de contraintes qu'elles doivent vérifier » « Avec un modeleur déclaratif, l'utilisateur se base donc sur son idée pour décrire les propriétés et les

contraintes qui doivent être satisfaites pour résoudre son problème. Il peut avoir une image mentale d'un objet qu'il imagine être une solution » (Colin, 1998).

On constate que ces définitions mettent l'accent sur la notion de **propriété**, notion essentielle, car c'est à partir d'une description élaborée à partir de la donnée d'un ensemble de propriétés que le concepteur va exprimer sa perception de la forme ou de la scène qu'il cherche à construire. Ce qui nous amène à la formulation de notre façon d'appréhender la modélisation déclarative (Gaildrat, 2003).

L'objectif ultime de la modélisation en CAO serait de disposer d'un système purement déclaratif, permettant d'obtenir automatiquement une ou plusieurs « formes solutions » à partir de la description des **propriétés, caractéristiques** et **contraintes** devant être satisfaites par l'objet à construire. La modélisation géométrique déclarative se situe dans cette perspective, et l'on peut dire que l'on passe avec elle à un niveau d'abstraction encore plus élevé, à travers d'un modèle conceptuel ou sémantique. Comme l'explique David Lesage: « *L'idée est qu'à partir d'une reformulation du cahier des charges d'un objet, le modeleur déclaratif produise automatiquement une ou plusieurs formes en adéquation avec la demande de l'utilisateur* ».

IV.1.2. La Structure du processus de modélisation déclarative

Le processus de modélisation déclarative se décline en trois étapes successives :

- La **description** des propriétés de l'objet : Pour traduire ses intentions, le concepteur manipule le langage de description des effets qui nécessite un bon niveau d'expertise du domaine (Gallas, 2013).
- **La phase de génération** de l'objet qui produit un ensemble de modèles numériques ou l'espace des solutions du problème posé. Cette étape de production des solutions est assurée par l'ordinateur qui manipule ses propres raisonnements et modèles utiles au calcul des solutions et à leurs représentations interne et externe (Gallas, 2013) ;
- **La prise de connaissance** des solutions ou espaces de solutions. Le système aide l'opérateur dans la sélection d'une ou plusieurs solutions en le guidant dans l'exploration des espaces de solution proposés. Les méthodes de visualisation jouent ici un rôle important dans la présentation visuelle des informations pertinentes. Ces trois phases décrivent un cadre méthodologique général à partir duquel des systèmes très variés de modélisation sont dérivés (Gallas, 2013).

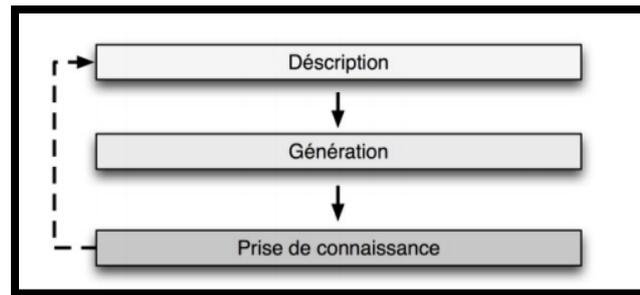


Figure IV. 72 : Structure du processus de modélisation déclarative (source : Gallas, 2013)

IV.1.3. Exemples des projets d'approches déclaratives

IV.1.3.1. GINA (Géométrie Interactive Naturelle)

Le projet Gina⁴² propose de créer une nouvelle génération de "modeleurs 3D" (Sosnov, Macé, Hégron, 2002). Il permet d'acquérir de façon interactive une maquette numérique 3D à partir d'un dessin ou d'une image et d'un énoncé de contraintes. Le modèle peut être reconstruit à partir d'une ou plusieurs images. Gina est basé sur la géométrie projective Macé (1997) et utilise l'algèbre de GRASSMAN-CAYLEY pour exprimer et manipuler les propriétés projectives, contrairement à la plupart des méthodes de reconstruction 3D qui traduisent ces propriétés sous forme numérique. Le processus incrémental peut se décomposer en trois étapes :

- Le dessin et la saisie des contraintes ;
- La reconstruction du modèle 3D ;
- L'affichage et la manipulation de la scène.

Ces étapes peuvent être répétées afin d'affiner progressivement le modèle en ajoutant des éléments géométriques ou des contraintes (Hégron).

⁴² Géométrie Interactive et Naturelle : projet de l'école des Mines de Nantes auquel collabore l'IRIN

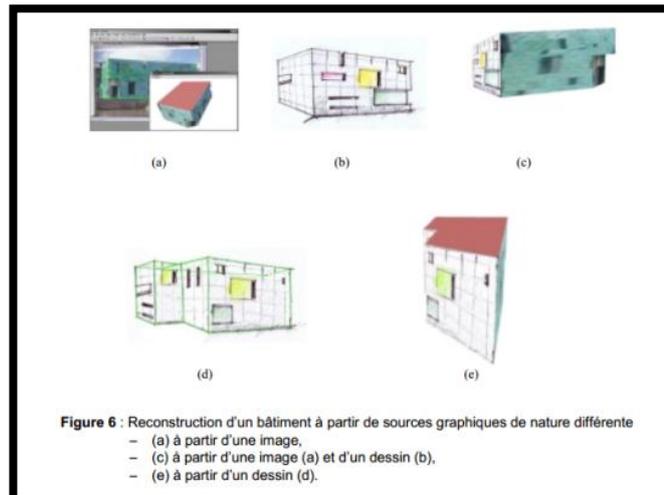


Figure IV.73: projet GINA (Géométrie Interactive Naturelle) (source : Gérard Hégron)

IV.1.3.2. L'outil Wordseye

Wordseye⁴³ Coyne, Sproat, (2002) ; est un outil de modélisation géométrique qui fait appel à un processus déclaratif. Il permet de générer des scènes composées d'objets tridimensionnels à partir d'une description textuelle des types d'entités géométriques (cube, pyramide, arbre), leurs propriétés (couleur, dimension) et les relations qui lient ces entités. Cet outil fait appel à un modèle de connaissance géométrique qui identifie les entités décrites. Le modèle géométrique crée les entités géométriques de la scène 3D qui respecte la description du début du processus. Cette scène tridimensionnelle est affichée par le modèle de visualisation qui offre des fonctions de navigation (Gallas, 2013).

⁴³ Cet outil est disponible sur ce lien <https://www.wordseye.com/>

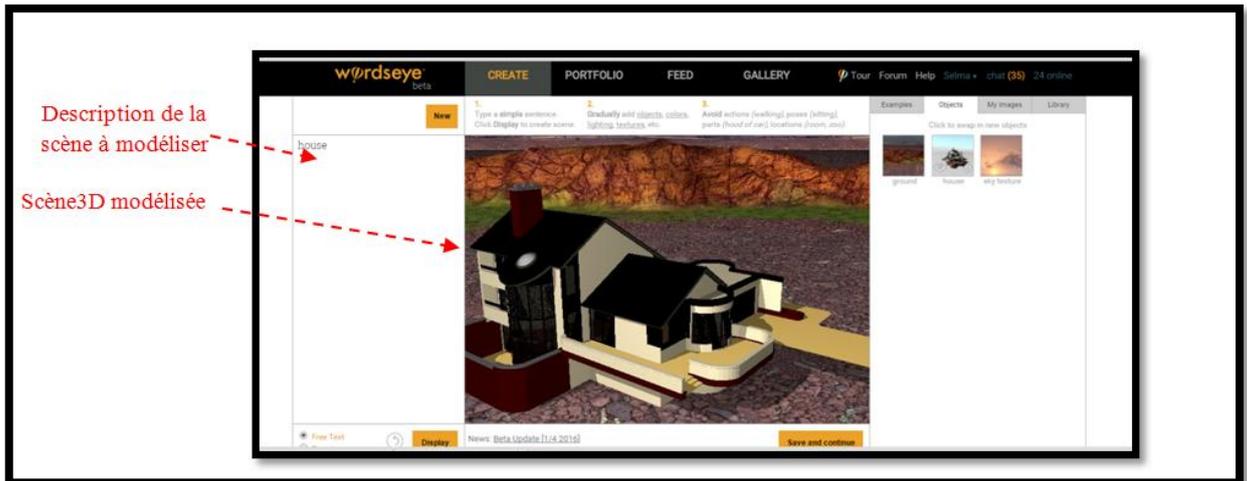


Figure IV.74 : Processus de modélisation déclaratif proposé par Wordseye® (source : Auteur)

D'autres exemples de l'application de la modélisation déclarative d'environnements virtuels complexes (Gaildrat)⁴⁴ dans :

- Modélisation générative de villes et populations
- Architecture
- Aménagement d'environnements virtuels

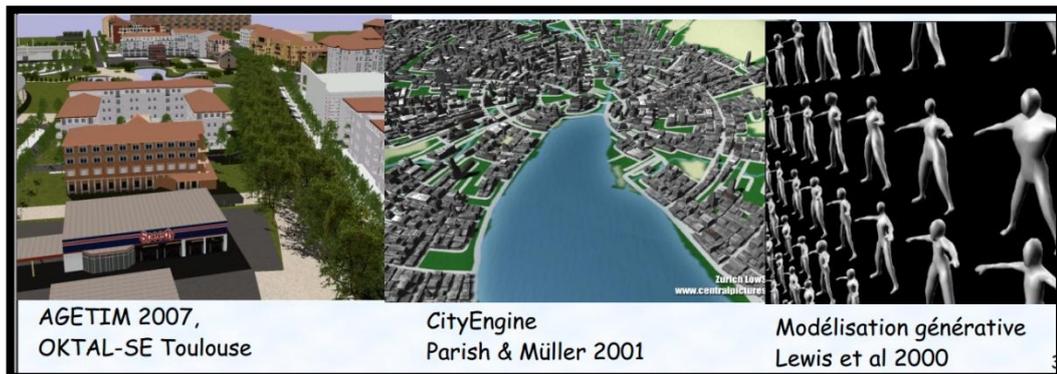


Figure IV.75 : Modélisation générative de villes et populations (source : Gaildrat)

⁴⁴ <http://www.irit.fr/~Veronique.Gaildrat/Ressources/ColloquePersonnagePresentation.pdf>
(DEMONS) Declarative Multimodal ModeliNg System

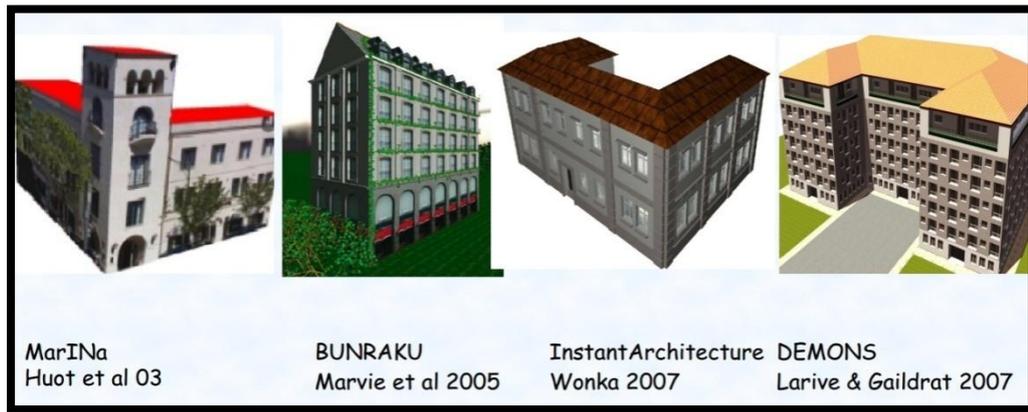


Figure IV.76 : Architecture source (Gaildrat)



Figure IV.77: Aménagement d'environnements virtuels source (Gaildrat)

IV.1.2.4. Les avantages de la modélisation déclarative

La méthodologie de Modélisation Déclarative offre au concepteur la possibilité de décrire un objet ou un environnement en utilisant des termes abstraits, au lieu des valeurs explicites pour des propriétés géométriques concrètes. L'avantage principal de cette approche, particulièrement pendant la première phase de conception, est de permettre au concepteur de se concentrer sur des caractéristiques qui sont plus près de l'intuition humaine (Gallas, 2013) ; et de pouvoir visualiser plusieurs solutions et les soumettre à comparaison.

Selon Gérard HEGRON, les avantages de la modélisation déclarative sont :

- La description de l'objet se fait dans le langage du concepteur : il s'agit de la description des effets recherchés ;
- Les solutions produites vérifient a priori les intentions du concepteur : les effets sont garantis ;
- Le logiciel génère toutes les solutions potentielles : c'est un outil d'aide à la créativité
- Le logiciel est un outil de négociation entre les acteurs du projet dans la recherche de compromis : il peut devenir un outil d'aide à la décision.

Selon Pierre-François Bonnefoi (1999), la modélisation déclarative dispose de quatre avantages sur la modélisation impérative :

- Elle est plus proche de l'utilisateur : c'est une modélisation qui permet à l'utilisateur de franchir les contraintes du modèle géométrique en se focalisant seulement sur la description de la scène sans s'inquiéter de sa traduction dans le modèle géométrique qui est la mission du modéleur déclaratif qui détermine précisément la ou les scènes présentant les propriétés énoncées.
- Une modélisation mieux adaptée au processus progressif de modélisation : en permettant de manière continue la modélisation d'une scène quels que soient le nombre et la quantité des propriétés à vérifier, elle est vue comme mieux adaptée au processus progressif de modélisation. Ces propriétés peuvent être organisées de telles manière que l'utilisateur ne soit pas obligé de préciser la scène entièrement mais seulement jusqu'à un certain niveau de détail choisi. Ainsi, si l'utilisateur n'a pas encore déterminé la nature exacte de certains objets de la scène, il peut tout de même obtenir une première ébauche de la scène, résultat qu'il pourra ensuite affiner.
- Cette modélisation est caractérisée par une manipulation d'aspects non purement géométriques : l'une des caractéristiques de la modélisation déclarative, c'est que dans un premier temps, elle offre la possibilité de manipulation d'aspects non purement géométriques comme la couleur ou la texture d'un objet et d'exprimer également des propriétés sur ces aspects. Dans un deuxième temps, la possibilité de lier ces aspects non géométriques à des informations géométriques à l'aide de propriétés spécifiques : colorer les objets ou appliquer des textures suivant leurs dimensions, etc...
- La conservation des propriétés d'une scène durant ses modifications : en conservant les propriétés initiales de la scène (celles qui ont permis d'engendrer la scène), la modélisation déclarative rend possible et aisée toute modification de la scène et il est ainsi possible de « plonger » une propriété dans le modèle géométrique et de pouvoir la conserver au-delà des transformations successives de la scène, sans avoir à l'extraire par une analyse de cette dernière (Bonnefoi, 1999).

IV.1.2.5. Les limites de la modélisation déclarative

La limitation principale de l'approche déclarative ou inverse est qu'elle ne produit essentiellement que des esquisses de solution. La modélisation classique, dite impérative, peut alors prendre le relais afin de produire la maquette numérique définitive de l'objet. On

pourra alors tirer parti de toutes les qualités intrinsèques du modèle géométrique choisi pour fabriquer l'objet ou communiquer (Hegron).

L'interprétation de la description est un problème important que pose la modélisation déclarative. La manipulation de concepts de haut niveau induit souvent une multiplicité d'interprétations possibles. La notion d'interprétation est souvent subjective, et la plupart des modeleurs déclaratifs n'ont que très partiellement abordé le problème. Pourtant l'efficacité d'un modeleur déclaratif dépend de l'adéquation entre l'interprétation de l'utilisateur et celle de l'outil (Tahiry, 2012).

La plupart des modeleurs déclaratifs actuellement existant ne prennent pas en charge cette étape d'interprétation et considèrent en entrée un script descriptif de bas niveau d'abstraction, très proche des contraintes attendues par la phase de génération. Cette étape d'interprétation est donc totalement occultée, sauf par des travaux qui ont, a contrario, fait porter leurs efforts sur elle, et n'ont pas cherché à créer des scènes d'une complexité approchant celle de scènes réalistes. C'est le cas du projet **WordsEye** qui est un système de type « text-to-scene » qui prend en entrée une description en langage naturel et qui s'appuie sur une base de connaissances très riche. L'interprétation consiste à déterminer pour chaque objet et chaque personnage présent dans la scène quelles sont les relations à prendre en compte à partir de la description : les positions relatives des entités et la façon de les utiliser quand il s'agit d'objets.

La plupart des modeleurs déclaratifs utilisent l'exploration d'un univers, souvent fini, de formes possibles, pour rechercher celles vérifiant les propriétés données grâce à la description. Cette recherche peut conduire l'utilisateur vers des solutions qu'il n'envisageait pas. Cependant, en fonction de la précision de la description, il peut y avoir un nombre très important de solutions, bien au-delà de ce que l'utilisateur peut gérer de lui-même pour savoir faire la différence, car beaucoup de solutions peuvent paraître similaires. Néanmoins la présentation de toutes les solutions possibles peut être un choix délibéré pour certains modeleurs, quel qu'en soit le nombre (Tahiry, 2012)

Selon Gérard HEGRON les deux approches de modélisation, l'une impérative et l'autre déclarative, ne sont en définitif pas exclusives l'une de l'autre. Elles traduisent chacune un langage de représentation, l'un de la forme et l'autre de ses effets, qu'il convient d'employer

pour des modes de pensée et d'action appropriés, l'un de conception et l'autre de construction.

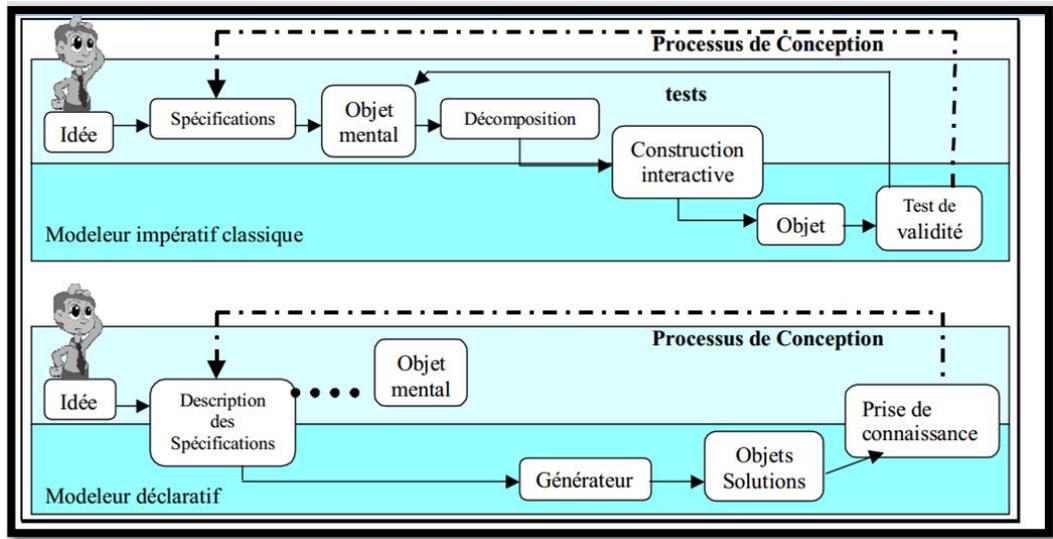


Figure IV.78 : Différences entre modèleur impératif et modèleur déclaratif (CDMM97)

Le groupe de travail GEODE a décrit la différence entre modélisation déclarative et modélisation effectuée à l'aide d'un modèleur impératif⁴⁵ (Tahiry, 2012).

Tableau IV.12 Tableau : Comparaison entre modèleur impératif et déclaratif (GEODE) (source : Tahiry, 2012)

Modeleur impératif	Modeleur déclaratif
Le concepteur a une idée d'objet à modéliser.	A partir de l'idée : Description d'une scène ou de la forme d'un objet à partir de ses propriétés.
Un processus mental doit amener de l'idée à un ensemble d'opérations élémentaires fournies par le modèleur.	L'image mentale de l'objet solution n'est pas directement utilisée pour la conception.
Construction de l'objet par planification mentale des opérations élémentaires.	Le modèleur fournit les solutions à partir de propriétés => pas nécessaire de vérifier la validité.
Réalisation des opérations élémentaires, pas à pas.	A partir des solutions obtenues : Processus incrémental de modification des spécifications.
Tests de validité négatifs => reprendre la décomposition.	Le concepteur peut se concentrer sur des tâches de plus haut niveau d'abstraction.
Modifications à apporter => reprendre une, plusieurs ou l'ensemble des solutions.	Le modèleur déclaratif fournit un modèle de solutions à partir desquelles il est possible d'obtenir une, plusieurs ou l'ensemble des solutions.

⁴⁵ GEODE est une équipe du GDR-PRC AMI. Elle est constituée de l'équipe MGII de l'institut de Recherche en Informatique de Nantes, du CERMA de l'école d'Architecture de Nantes, et de l'équipe synthèse d'images de l'Ecole des Mines de Nantes.
Voir : www.emn.fr/dept_info/GEODE

Le modèle géométrique sous-jacent est totalement caché au concepteur.

IV.2. L'Approche inverse en éclairage naturel

VI.2.1. Simulation inverse de l'éclairage

La simulation inverse appartient à une catégorie plus générale de problèmes inverses traités dans les champs des sciences physiques, de la modélisation géométrique, de l'automatique ou de l'imagerie (Siret, 1997). La préoccupation de la simulation inverse est de rechercher **les causes** d'un phénomène à partir de **ses effets**. La simulation inverse de l'éclairage propose d'agir directement sur le bâtiment à partir de la description **des intentions d'ambiance lumineuse** (Torre, 2007).

Les outils et méthodes de simulation inverse des ambiances doivent satisfaire trois conditions :

- permettre de formuler des intentions d'ambiance, c'est-à-dire de définir des effets particuliers du projet concernant les ambiances,
- autoriser la manipulation et la transformation de ces intentions, au fil de la conception, pour permettre le développement du discours du projet,
- être capables de réaliser les effets donnés en déterminant les conditions à appliquer sur les formes pour ce faire et, pratiquement, en déterminant les formes elles-mêmes réalisant ces effets (Siret, 1997).

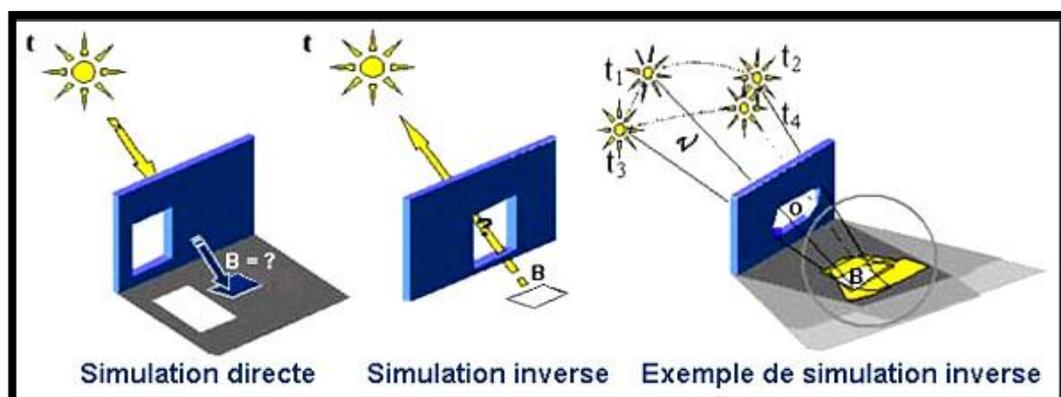


Figure IV. 79 : le processus direct et inverse de simulation de l'ensoleillement (source : Houpert, 2004).

IV.2.2. Etat de l'art de la simulation inverse de l'éclairage naturel

En 1979 Radford et Gero proposent d'optimiser l'éclairage d'une pièce par sa fenêtre. Pour des cas simples, les auteurs affirment trouver la réponse formelle optimale à une contrainte d'éclairage donnée, tout en permettant de minimiser le coût et la consommation d'énergie d'une telle solution (Houpert, 2004).

G. Stevens (1990) ou Schoeneman et al. Utilisent cette notion pour introduire certains problèmes d'optimisation appliqués à la conception. Dans une perspective analogue, Augenbroe et Winkelmann (1991) spécifient les types de problèmes posés par l'intégration des outils de simulation dans le projet. Selon les auteurs, ces problèmes sont de type inverse (« que dois-je faire pour obtenir ce résultat »), de type interrogatif (« pourquoi ce que j'obtiens n'est pas ce que j'avais prévu ») et enfin de type incrémental (« faire comme avant mais un peu différent »). Les auteurs préconisent des approches « **intelligentes** » de la simulation (**systèmes experts**) pour aider à la résolution de ces problèmes, et en particulier des problèmes inverses. De fait, les méthodes de raisonnement automatique apparaissent comme des outils potentiels de résolution de problèmes inverses (Siret, 1997).

La notion de simulation inverse existe de manière explicite dans la littérature, Khemlani du Martin Center for Architectural and Urban Studies à Cambridge (USA) analyse dans un article Khemlani (1995) le logiciel GENWIN capable de produire l'ensemble des solutions d'ouvertures sur une façade pour une contrainte d'éclairage réglementaire à l'intérieur d'une pièce rectangulaire. Les ouvertures ne doivent pas être plus de trois et suivent une trame de cinquante centimètres sur cinquante centimètres. Pour chaque solution, l'utilisateur peut en cliquant sur la représentation graphique de l'ouverture obtenir des informations sur les dimensions des fenêtres préconisées, et le niveau d'éclairage des zones de la pièce en plan.

Mahdavi et Berberidou-Kallikova (1995) adopte un point de vue implicite (essai-erreur) du problème et utilise une stratégie d'optimisation orientée par des préférences dynamiques, pour prendre en compte l'ambiance lumineuse et reconstruire des ouvertures.

Signalons aussi les travaux de A. C. Costa (Costa 1999 et 2000) et sa méthode de simulation inverse de l'éclairage intérieur basée sur l'hypothèse d'une **réflexion diffuse** idéale des matériaux. La réflexion sphérique de la surface qui doit être éclairée est discrétisée en des angles solides élémentaires. Pour une direction choisie, le faisceau d'angles solides lui

correspondant est prolongé jusqu'au plan support de l'éclairage. Les caractéristiques de l'éclairage sont données par l'analyse de l'intersection entre ce faisceau et le plan support. Il affirme pouvoir répondre à des requêtes du type : "éclairer suffisamment une zone à l'intérieur d'un volume cylindrique, à partir d'un premier spot dirigé vers le plafond et d'un deuxième éloigné du premier et moins puissant".

Siret (Siret, 1997) traite la simulation inverse de l'ensevelissement par une méthode de calcul géométrique. Ce dernier gère le temps comme une somme d'instantanés et considère l'impact global de la tâche solaire. Il recherche une géométrie permettant la visibilité du soleil pendant une certaine période de temps. La solution proposée est basée sur des « **pyramides complexes d'ensevelissement** ».

Houpert (Houpert, 2003) développe dans sa thèse un outil de modélisation des contraintes solaires et visuelles. Ses travaux valident l'outil basé sur la simulation inverse par des tests en situation réelle et une analyse des réactions des utilisateurs. La méthode de conception générale considère le projet comme flou, et la conception elle-même est une suite de réduction d'incertitudes et de résolution de contraintes.

IV.2.3. Classification des méthodes inverses

En réalité, il apparaît que de nombreuses approches d'aide à la conception utilisent implicitement cette notion et mettent en œuvre des méthodes très diverses visant toujours à la résolution d'un problème inverse du projet. Siret (1996) propose une classification de ces approches en trois catégories :

- les approches de type génératif (Generate and Test).
- les approches d'aide experte
- les approches par optimisation,

Toutes ces approches possèdent en commun le fait de pouvoir formuler un objectif à atteindre (l'effet à réaliser) et de déterminer les conditions que doivent vérifier les formes du projet pour satisfaire cet objectif (réaliser l'effet).

IV.2.3.1. Méthodes génératives

Cette approche dite encore Generate and Test, Stevens (1990), Il s'agit, dans un même programme, de **générer** d'abord un grand nombre de **solutions** plausibles à un problème donné, puis de **tester** ces solutions (par une méthode de simulation directe) pour en extraire

la ou les meilleures conformément à l'objectif ou la contrainte fixée. A titre d'exemple l'approche est celle de L. Khemlani (1995).

Les principales limites de cette approche sont les suivantes (Siret 1996).

- Les solutions doivent être basées sur un modèle a priori et leur génération s'expose au problème de l'explosion combinatoire dès qu'un grand nombre de paramètres interviennent.
- la méthode de simulation employée doit être suffisamment simple et rapide pour être appliquée de manière automatique sur un très grand nombre de solutions. Elle doit par ailleurs fournir une appréciation synthétique des résultats, sous la forme d'indices par exemple. Sont donc exclues toutes les méthodes qui fournissent des résultats difficiles à interpréter ou dont l'interprétation appelle un savoir expert.

IV.2.3.2. Aide experte

Approche optant pour une intégration, dans un système de conception assistée par ordinateur, d'un savoir expert manipulé par des mécanismes de raisonnement automatique ou plus généralement d'intelligence artificielle. A titre d'exemple la méthode de Augenbroe et al. (1993).

Cette approche pose différentes difficultés (Siret 1996) :

- le système d'expertise s'appuie sur des règles normatives ou sur des corrélations n'exprimant généralement que des lois de comportement moyen ; il se peut que l'ensemble de ces connaissances ne fournisse pas d'expertise correcte pour une construction innovante.
- Cette approche ne permet pas de proposer directement une solution réalisant une propriété donnée ; elle ne peut qu'orienter l'évolution du projet vers une solution supposée meilleure.
- l'approche experte suppose une conduite globale du projet sur la plateforme du système et exclut tout autre support de conception puisque l'information architecturale doit être structurée de manière à permettre l'expertise (les travaux intéressant spécialement ce problème de l'intégration des outils sont par ailleurs nombreux).

IV.2.3.3. Techniques d'optimisation

Ces approches considèrent le projet comme un problème à résoudre. Elles font l'hypothèse qu'il existe au moins une solution à ce problème et que, lorsque plusieurs solutions existent, l'une d'elles peut être qualifiée d'optimale par rapport à certains critères. Qui s'appuient sur des méthodes mathématiques pour formaliser et résoudre des **problèmes multicritères** capables de prendre en compte l'ensemble des variables caractérisant le projet. A titre d'exemple la méthode de Radford et Gero (1979). Différentes méthodes existent :

Des algorithmes génétiques, algorithmes basés sur la sélection de Darwin, **des systèmes de radiance inverse**, **des méthodes heuristiques**, c'est-à-dire faisant intervenir une « méthode de calcul qui fournit rapidement une solution réalisable, pas nécessairement optimale ou exacte ». Les méthodes heuristiques peuvent être générales, c'est à dire applicables à différents problèmes ou spécialement mises au point pour un problème particulier.

Les approches, génératives, d'aide experte ou d'optimisation, n'apportent pas de solution à ce problème. Elles donnent cependant différentes méthodes pour la réalisation de propriétés connexes concernant l'énergétique ou l'éclairage du projet. Ces approches illustrent également les traits fondamentaux du processus de simulation inverse dans un contexte de conception (Siret, 1997) :

- Elles permettent au concepteur de formuler un objectif explicite sur le projet dans leur domaine de compétence,
- Elles assurent de pouvoir accéder à une ou plusieurs solutions (dont elles définissent la nature) supposées réaliser l'objectif fixé, de manière incrémentale (aide experte) ou directe (méthodes génératives et techniques d'optimisation),
- Enfin, conséquence de ces deux points, elles permettent d'envisager la conception comme un processus de démarcation d'intentions suscitant plus ou moins directement la mise en forme du projet.

IV.2.4. Représentation des intentions d'ambiances

Une intention d'ambiance est l'idée d'une ambiance qu'un architecte souhaite créer dans le projet architectural. Il imagine non pas l'objet architectural mais la perception que les usagers, *a fortiori* lui-même, pourront avoir de l'objet architectural. Selon Faucher (Faucher et Nivet, 1998), l'intention architecturale est le désir exprimé de matérialisation d'une sensation.

Quelles que soient les méthodes mises en œuvre dans les approches inverses de simulation, un problème sous-jacent est celui de la représentation des résultats attendus. Les approches inverses partagent en effet le fait de partir du résultat pour déterminer une ou plusieurs configurations architecturales susceptibles de vérifier ce résultat. Dans le contexte de la conception, les résultats s'expriment en termes de propriétés à réaliser et ces propriétés représentent les intentions du concepteur. (Gallas, 2013). Les intentions d'ambiance sont donc en relation avec la perception propre du concepteur. Cette perception étant liée intimement à l'expérience, les intentions sont inspirées du vécu. Une intention d'ambiance est donc toujours une référence à une ambiance vécue. Aussi, au même titre qu'il existe des bâtiments de référence, nous pensions imaginer des ambiances de référence. Conception par l'intention d'ambiance. Cette dernière a été utilisée comme point de départ. L'avantage de cette méthode est de travailler directement sur l'ambiance du projet qui sera perçue par l'utilisateur, sans être obligé de passer par un intermédiaire (Tourre, 2007).

Plusieurs travaux abordent ce problème dans une perspective plus dynamique. Plutôt que de considérer les intentions à réaliser comme des entrées statiques du processus de conception, **L. Mudri** (1994) propose une représentation sémantique très suggestive des propriétés lumineuses à réaliser. **Schoeneman et al.** (1993) permettent au concepteur de dessiner de manière intuitive les tâches de lumière à réaliser dans une scène en trois dimensions. Ces recherches mettent en avant l'intérêt de la manipulation et de l'ajustement progressif des intentions, parallèlement à l'ajustement des formes.

Des méthodes de modélisation déclaratives ont utilisé le texte, le dessin (technique et artistique) et l'image comme moyen de description des intentions. Ces formats sont ainsi capables de représenter et de donner forme à des idées ou à des sensations non quantifiables. Les interactions entre les différents formats de représentations des effets de lumière naturelle et le concepteur permettent l'émergence des idées et des intentions en rapport avec son contexte de conception (Gallas, 2013).

IV.2.5. Exemples des outils de simulation inverse pour éclairage naturel

IV.2.5.1. L'outil « Solimac »

Dans ce contexte Daniel Siret (Siret, 1997) propose l'outil « Solimac » qui dispose d'une interface où l'utilisateur peut décrire un objectif d'éclairage matérialisé par une tâche solaire de forme rectangulaire. Cette tâche est contextualisée en définissant une localisation

dans le temps et dans l'espace. Le modèle déclaratif traduit la description de la quantité d'apports lumineux et leur localisation dans l'espace en une entité géométrique appelé pyramide d'enseillement. Cette activité de traduction fait appel à un modèle de connaissance physique du comportement de la lumière naturelle. Le modèle géométrique calcule l'intersection entre la pyramide d'enseillement et la forme géométrique de l'espace de base. Ce processus génère une géométrie brute qui nécessite un traitement. Ce traitement consiste à donner une forme architecturale (ouverture, baie, auvent, brise soleil) des entités géométriques issues de l'opération d'intersection.

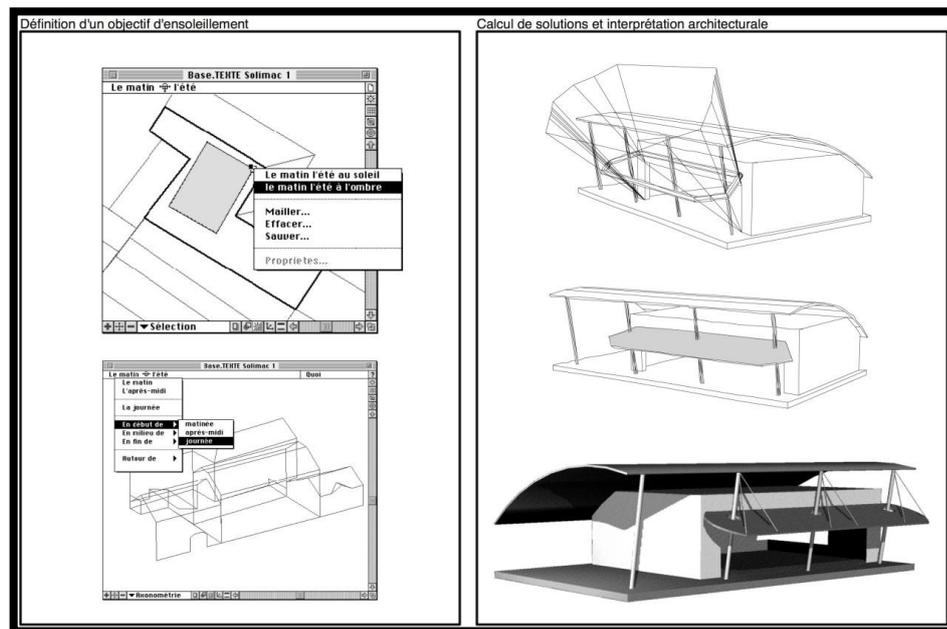


Figure IV.80 : Interface et fonctions de Solimac (source : Siret, 1997)

IV.2.5.2. L'outil LightSketch

LightSketch (Glaser et al, 2003) est un outil de modélisation utilisant un langage de description graphique pour la modélisation de scènes d'éclairage naturel et artificiel. Cet outil propose un processus de modélisation graphique faisant appel à une grammaire de signes pour représenter les entités géométriques d'un espace et des dispositifs d'éclairage naturel et artificiel. Cette méthode fait appel à un traducteur (*Satin*) qui interprète les données graphiques saisies pour les convertir en dispositifs architecturaux ou d'éclairage constituant ainsi la scène tridimensionnelle. Un moteur de simulation (Radiance®) permet d'évaluer le comportement lumineux sous différentes conditions d'éclairages et propose un rendu photo-réaliste de la scène éclairée. Un modèle de visualisation propose des options d'affichage de

la scène d'éclairage prenant en compte la variation de l'effet de lumière produit dans le temps (jour, heure et saisons).

L'outil LightSketch fait appel à une représentation graphique en 2D, de faible niveau de précisions correspondant utilisant les mêmes codes que les dessins d'esquisse, pour décrire des intentions et des idées architecturales. Elle offre ainsi une possibilité de modélisation, de simulation et d'évaluation simplifiée du comportement lumineux à partir de dessins d'intentions. Ce modèle peut participer à la réduction de la complexité de maîtrise du comportement lumineux qui caractérise les phases conceptuelles du projet d'architecture.

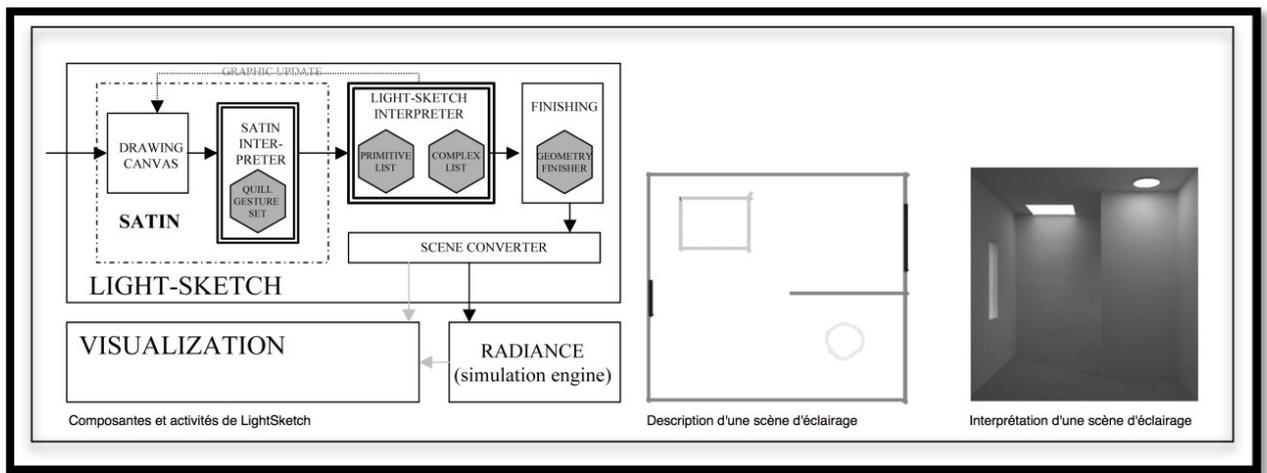


Figure IV.81 : Processus et résultats du modèle déclaratif LightSketch extrait de (Glaser et al, 2003)

IV2.5.3. l'outil «Expression »

Dans son travail de thèse de doctorat Vincent Tourre, il a développé un modèle de simulation inverse de l'éclairage permettant la prise en compte de la lumière naturelle dans le projet architectural. Une méthode numérique d'aide à la « conception par l'intention d'ambiance » qui s'apparente à la conception paramétrique. Cette recherche est focalisée sur la lumière incidente provenant de la voûte céleste et de l'environnement urbain. Cette méthode qui concrétise les intentions d'ambiance lumineuse, par la production des propriétés géométriques et photométriques des ouvertures. Cette méthode s'attache tout d'abord à matérialiser les intentions d'ambiance lumineuse dans une scène 3d, par un rendu photométrique et des descripteurs graphiques. L'action sur ces descripteurs permet au concepteur d'exprimer ses intentions d'ambiance lumineuse à travers les paramètres physiques de l'éclairage. Un modèle de simulation inverse de l'éclairage utilise ensuite ces paramètres physiques pour calculer les ouvertures. Le problème de la simulation inverse est posé comme une recherche d'émission de sources. Une comparaison d'images

entre l'apport des sources lumineuses et l'éclairage souhaité, permet d'évaluer les propriétés des éléments d'ouverture, et par conséquent, de définir les ouvertures du bâtiment.

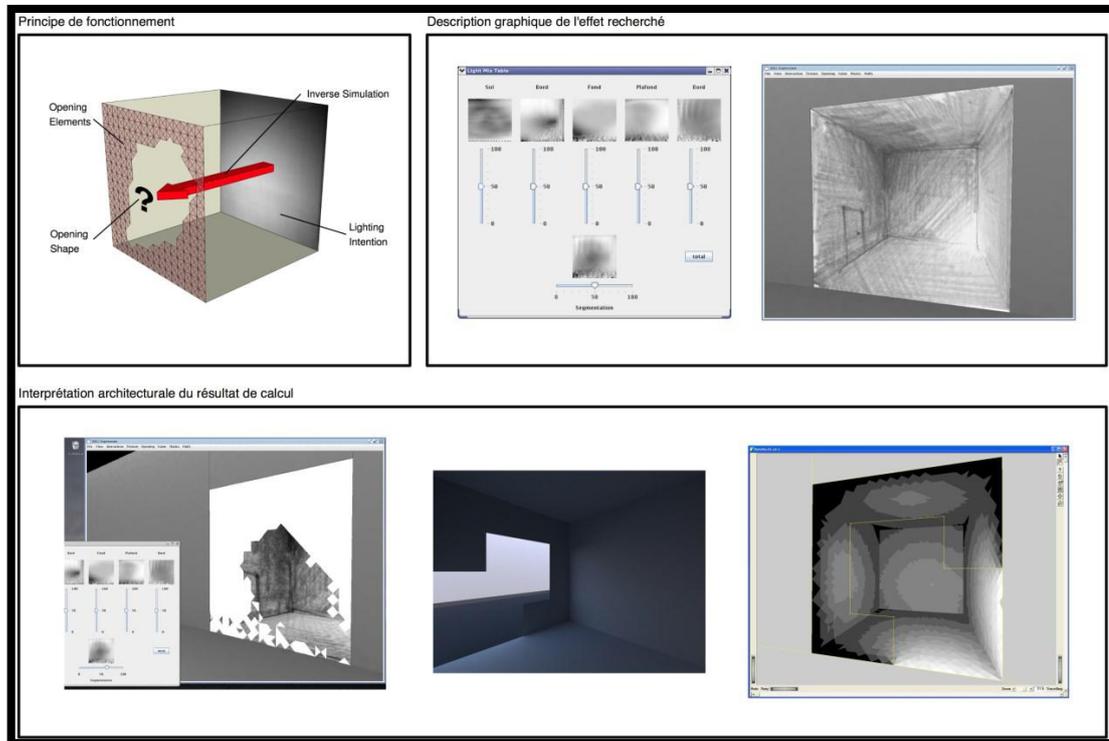


Figure IV.82 Principe de fonctionnement et résultats de la méthode inverse proposée par Vincent Tourre (source : Tourre, 2007)

IV2.5.4. Détail d'un prototype de logiciel de conception de lumière inverse

Gallas a proposé, dans son mémoire de Master, un modèle déclaratif. Ce dernier présente une interface concentrique, où le premier choix du concepteur se trouverait au centre. A chaque choix que celui-ci effectue, une nouvelle strate apparaît, entourant les précédents choix. Les choix terminés, le logiciel va proposer différents résultats. Tant que le concepteur n'est pas arrivé au bout du processus de déclaration d'intentions, seule la partie A s'affiche sur l'écran. Lorsque les résultats apparaissent, la partie A reste visible mais la fenêtre est rétrécie et se positionne en haut à gauche. La partie B donne un récapitulatif des données géographiques et climatiques du lieu. En C, sont présentées les solutions classées selon leur niveau de fidélité par rapport aux intentions émises. Elles apparaissent sous forme d'images de synthèse encadrées. Le code couleur utilisé pour le cadre a été dressé par un expert, le vert est utilisé pour les images ayant une conformité totale avec les intentions émises par le concepteur, l'orange pour celles ayant une conformité partielle. En D, est présenté un historique des choix, le concepteur peut en effet modifier sa déclaration d'intention à tout

moment et revenir sur l'une ou l'autre des strates circulaires. Les simulations de l'effet produit durant toute l'année et à différentes heures, les simulations d'éclairage ainsi que les images en fausses couleurs apparaissent dans les parties E et F. La partie G nous montre quelques projets de références qui utilisent le même type de dispositif et qui génèrent le même effet que celui voulu. Le but de cette recherche était de proposer une méthode capable de générer un espace éclairé à partir d'une déclaration d'intentions et de concrétiser ses idées. Le concepteur peut ainsi vérifier ses intentions et faire preuve de créativité en modifiant ses idées ou en faisant appel à de nouvelles. A la base, une identification de certaines ambiances lumineuses avait été faite (Cervantès, 2012).

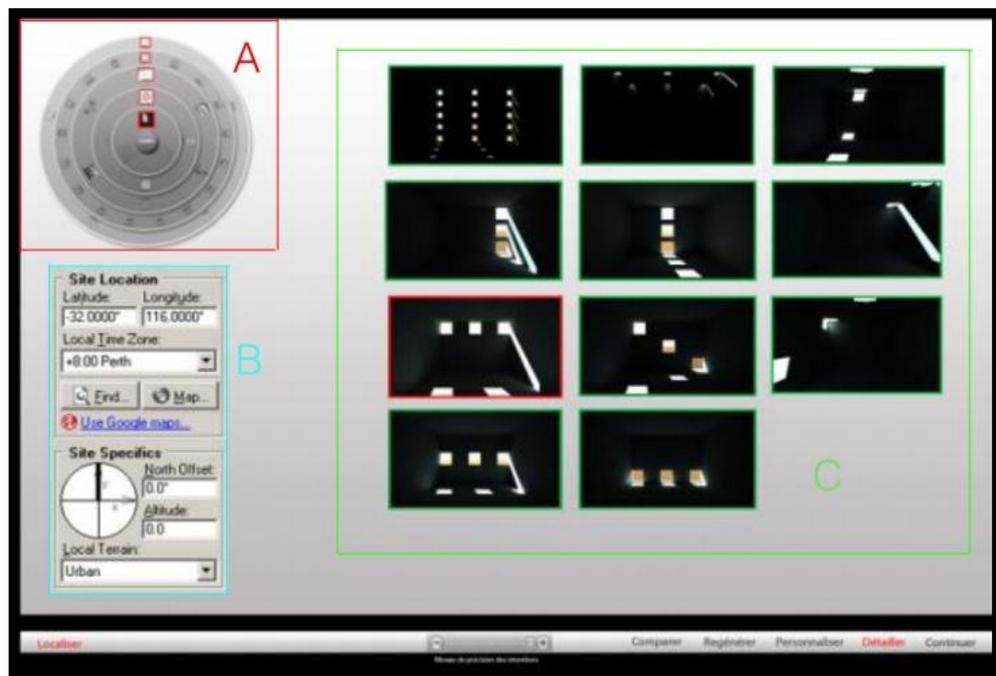


Figure III.83 : Prototype d'interface et de types de solutions que pourrait avoir et proposer le futur outil. (M. A. Gallas, 2009)

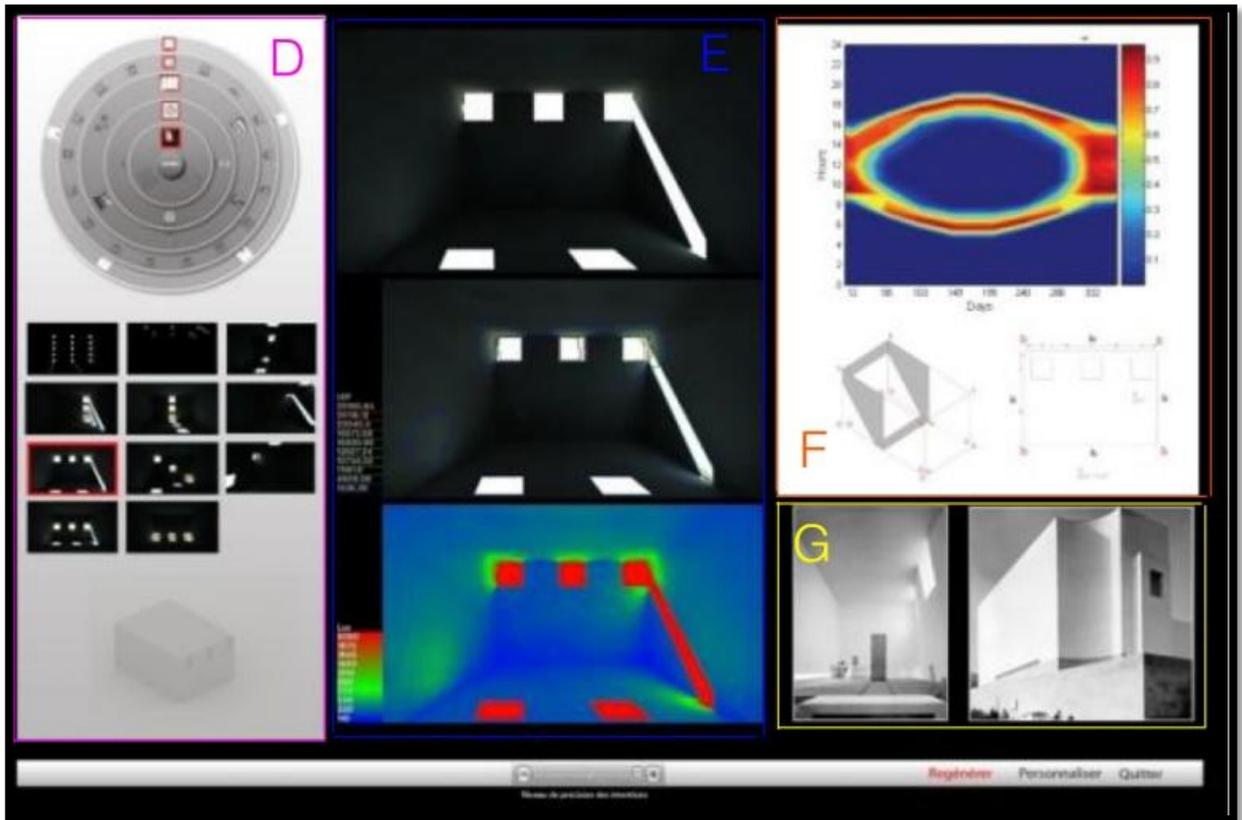


Figure III.84: Prototype d'interface et de types de solutions que pourrait avoir et proposer le futur outil (suite). (Source : Gallas, 2009)

IV2.5.4. Le prototype d'outil d'assistance *DaylightGen*

La méthode mise au point par Gallas se veut adaptée aux premières phases de conception. Pour cela, il faut qu'elle puisse interpréter les intentions du concepteur pour pouvoir générer des solutions. Cette méthode permet de structurer les idées du concepteur. Celui-ci sélectionne des images de référence représentatives de l'ambiance lumineuse qu'il veut mettre en place sur Day@mbiance (Chaabouni, 2011). La totalité des images choisies constituent alors une base de connaissances et un lien entre Day@mbiance et Daylightgen (outil proposé). Daylightgen est un outil qui prend en compte la déclaration d'intentions par le biais de Day@mbiance. Cet outil possède un système génératif appelé Galapagos qui permet de traduire les intentions du concepteur, recueillies auparavant, en solutions potentielles sous forme de modèle 3D. Un système d'évaluation Diva-for-Rhino évalue la capacité des solutions à répondre correctement aux intentions initiales. Les fonctionnalités du modèleur Rhinoceros et celles de GrassHopper permettent de visualiser et de modifier les modèles générés.

Cet outil permet au concepteur d'intégrer les notions de lumière naturelle, d'ambiance lumineuse et de comportement thermique dès les premières phases d'esquisse. Les moyens informatiques ne permettant pas de comprendre un dessin, les mots étant déjà trop réducteur et n'ayant pas tout à fait le même degré d'importance pour chaque individu, ils ne peuvent être utilisés. Le choix par l'image (méthode déclarative) semble être un bon moyen pour caractériser les souhaits du concepteur. C'est en multipliant le choix d'images que le concepteur réduit le nombre de solutions que l'outil lui proposera et ainsi qu'il obtiendra des propositions plus ciblées. Il paraît important qu'il y ait plusieurs solutions proposées afin de guider le concepteur, de le conforter dans ses choix et non de lui dicter la démarche à suivre.

Cela aidera l'utilisateur à maîtriser la composante lumineuse et énergétique même si l'état d'avancement de son projet n'en est qu'à ses débuts. Cet outil peut aussi encourager à la créativité en proposant au concepteur des solutions auxquelles il n'aurait pas pensé ou en lui proposant des effets lumineux qu'il n'aurait pu imaginer. Il est difficile pour un jeune concepteur d'avoir mentalement une bonne visualisation des effets de lumière que produiront les dispositifs qu'il met en place dans ses projets. Il maîtrise encore difficilement les aspects de la lumière naturelle. Les outils actuels permettent de se servir d'images de référence mais non de visualiser les effets que le concepteur imagine et tente d'exprimer.

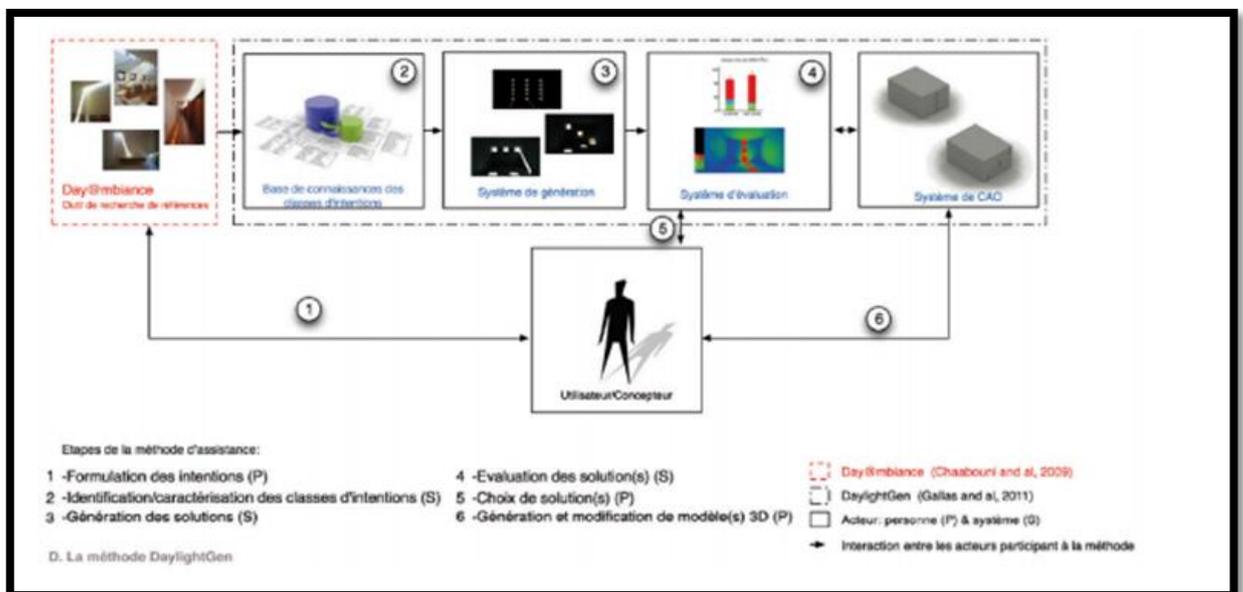


Figure IV.85 : la méthode de DaylightGen (source : Gallas, 2012)

Le passage de l'idée à la déclaration d'intentions par l'utilisation de Day@mbiance pour arriver à la génération de solution engendre un grand nombre de propositions de solutions

générées par Daylightgen. En effet, la première expérimentation de l'utilisation des classes d'ambiances pour la génération de solutions montre qu'il existe un manque de précision dans les solutions générées. Cela s'explique par les faibles écarts de valeurs rencontrés au niveau de la caractérisation des classes d'ambiances qui reste à présent assez floue. Cet aspect flou est pris en compte par le moteur génératif, au niveau des fonctions utilisées, afin de choisir les meilleures solutions. Les solutions proposées sont alors générées aléatoirement parmi celles de la classe d'ambiance choisie. Les solutions seront donc très générales.

La notion de classe ne suffira pas pour permettre une déclaration d'intentions efficace. Les paramètres utilisés pour la caractérisation sont subjectifs. Peut-être faudrait-il s'intéresser à tout ce qui crée une ambiance et non qu'à la classe d'ambiance. Une ambiance dépend des effets de la lumière qui pénètre dans l'espace (de la classe d'ambiance), de l'usage et des dispositifs mis en œuvre, le type d'ouvertures et la morphologie de l'espace (Cervantès, 2012)

Cervantès (2012) a proposé des patrons⁴⁶ d'ambiance pour préciser les choix des concepteurs. En fonction de leurs intentions, il commencerait par choisir des images sur Day@mbiance. Cette sélection définira, à partir des images, l'une ou l'autre des différentes classes d'ambiances. Ensuite, il passerait par les patrons d'ambiance pour affiner ses choix en choisissant un dispositif ou encore un usage. Lors de la conception architecturale, l'usage est normalement toujours connu. Ces choix permettront au système de fournir au concepteur des solutions plus adaptées à ses idées initiales.

Un patron d'ambiance prend en compte l'ambiance lumineuse d'un espace en fonction de son usage. Pour devenir un patron d'ambiance, il faudrait que l'ambiance représentée pour un certain usage soit retrouvée dans plusieurs projets avec un même dispositif (Cervantès, 2012).

⁴⁶ Christopher Alexander a identifié dans son livre écrit en 1977 et intitulé « A pattern language : Towns, Buildings, Construction » (Alexander, 1979) 253 patterns. Les patterns constituent un langage, ils décrivent un problème fréquemment rencontré par les concepteurs et proposent des solutions.

Un patron d'ambiance prend en compte l'ambiance lumineuse d'un espace en fonction de son usage. (Pour devenir un patron d'ambiance, il faudrait que l'ambiance représentée pour un certain usage soit retrouvée dans plusieurs projets avec un même dispositif.

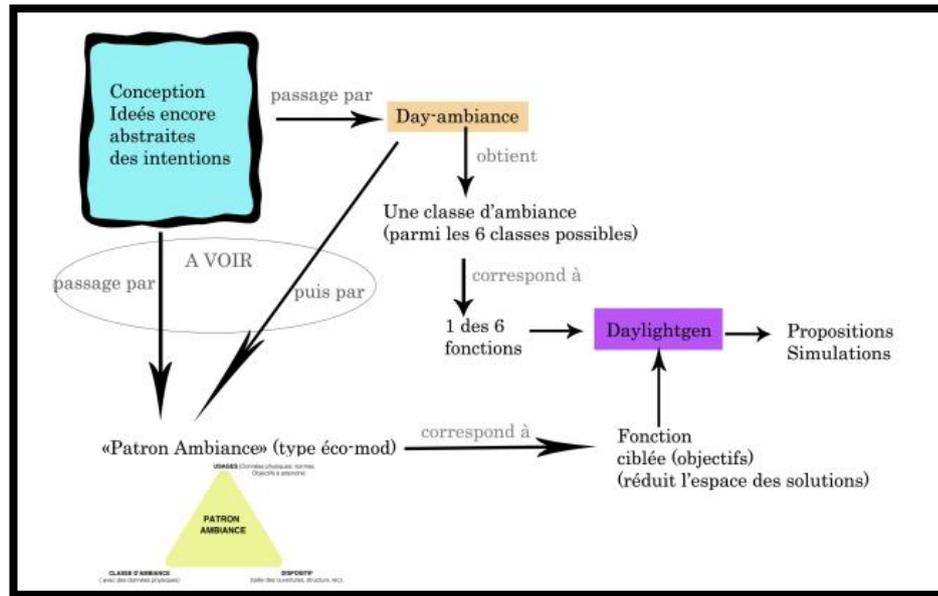


Figure IV. 86 : Les patrons d'ambiance dans le processus idée – déclaration d'intentions – génération de solutions source (Cervantès, 2012)

IV.2.5.5. L'outil DARMIN « Daylight Adaptive aRchitecture Modeling INterface »

Le logiciel DARMIN offre la possibilité de l'émergence de nouvelles réponses morphologiques complexes soutenant la démarche du design. Un outil d'aide à la conception qui permet de créer des façades adaptatives. Le modèle adaptatif de l'outil développé s'appuie sur un algorithme génétique. Elle permet en outre aux concepteurs d'expérimenter un large éventail de solutions possibles dans un laboratoire virtuel, un environnement de conception contrôlée qui renforce la créativité de l'architecte et le potentiel d'une structure architecturale adaptative qui bonifie quantitativement et qualitativement l'expérience de l'espace interne et externe, à travers la nature dynamique de l'ambiance lumineuse (Caglar, 2014).

Il permet de générer un grand nombre de possibilités esthétiques, offrant diverses propositions ayant le potentiel à répondre aux critères du concepteur. Le Facteur Lumière du Jour Moyen désiré dans l'espace et la notion d'Intention de Zones, permettant au concepteur de déterminer des zones qui seront ombrées ou ensoleillées par la lumière directe. La création de l'interface DARMIN est basée sur les deux composantes distinctes de lumière naturelle: la lumière directe du soleil, et la lumière diffuse. Cet outil propose 4 scénarios de génération d'ambiances lumineuses présentant les intentions du concepteur à l'étape initiale de design :

« Caché » où le concepteur recherche une intimité au niveau de la lumière en tentant de protéger l'observateur du contact visuel direct avec la lumière.

« Sacré » où le concepteur pourrait par exemple souhaiter une source linéaire horizontale sur la façade qui diffuse la lumière dans l'espace

« Équilibre » où l'on cherche à générer deux sources lumineuses latérales qui créent une ambiance lumineuse profane et diffuse

« Dynamique » où l'on cherche à générer une ambiance lumineuse dite « stimulante », impliquant plusieurs percées sur la façade pour créer ce dynamisme.

Le logiciel DARMIN est un outil hybride ayant pour but d'associer des impressions lumineuses à la fois quantitatives liées au calcul de FLJ et qualitatives, liées à des aspects plastiques avec des ombres et des taches solaires qui pourraient s'associer aux notions de distribution des luminances et d'éblouissement. Cette particularité hybride de l'outil développé supporte donc le concepteur pour associer un aspect sensible lié à l'ambiance lumineuse souhaitée dans son processus de design (Caglar, 2014).

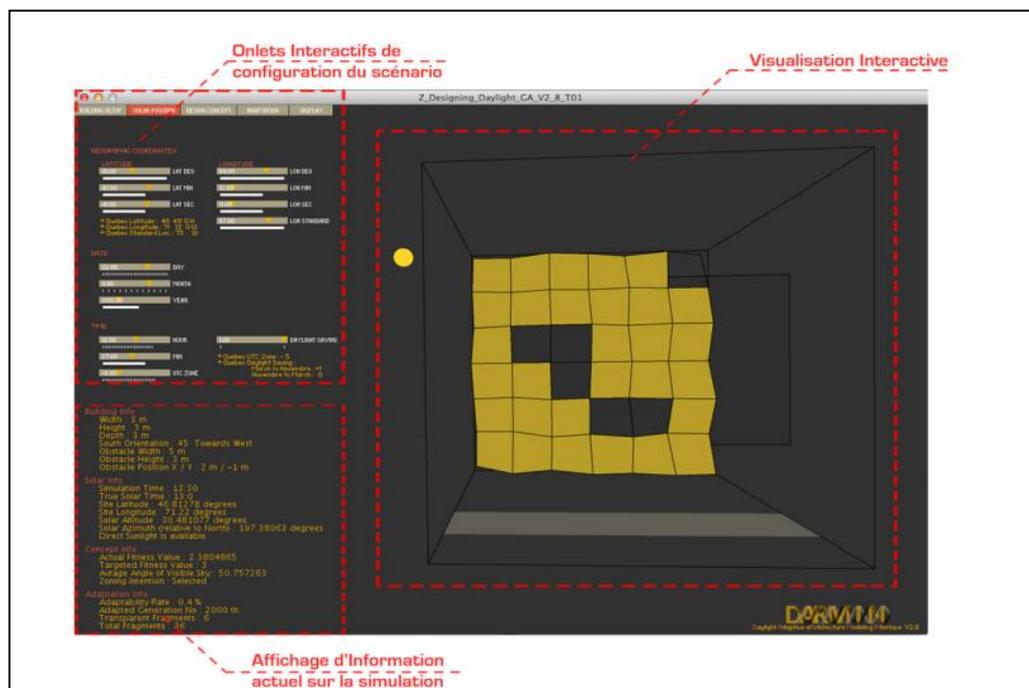


Figure IV.87 : Aperçu de l'interface de DARMIN (source : CAGLAR, 2014)

Tableau IV. 13 : récapitulatif (source : auteur)

Prototype de simulation inverse	Méthode de calcul	Entrées	Sorties
Solimac	Exploration graphique interactive des solutions masques solaires	Les intentions d'ambiances exprimées par tache d'ensoleillement	Propriétés géométriques
Expression	Recherche d'émittance de sources	Les intentions d'ambiances exprimées à partir l'esquisse	Propriété géométrique + photométrie visuelle et calculées
LightSketch	traducteur (<i>Satin</i>)	une grammaire de signes pour représenter les entités géométriques	dispositifs architecturaux
Prototype de logiciel de conception de lumière inverse (Gallas)		Types d'espace et type d'effet de lumière	Possibilité de comparaison entre 2 solutions + photométrie
DaylightGen	la méthode Cumulative sky (Robinson, Stone, 2004) radiance	Les intentions d'ambiances exprimées à partir des effets de lumière (images photographique Day@mbiance)	Générer des solutions+ photométrie+ visuelle et calculées
DARMIN	un algorithme génétique	Le Facteur Lumière du Jour Moyen désiré dans l'espace et la notion d'Intention de Zones	Créer des façades adaptatives. Propose 4 scénarios de génération d'ambiances lumineuses (Caché, Sacré, Équilibre, Dynamique) calcul de FLJ

IV. CONCLUSION

Nous avons d'abord commencé par évoquer en premier axe la philosophie de l'approche inverse, cette dernière nous a donné l'occasion de découvrir la méthode déclarative appliquée à une problématique architecturale, à travers la structure de processus de cette démarche ses objectifs, les avantages et les inconvénients de cette approche ainsi que leur objectifs alors que le deuxième axe a abordé l'application de cette approche sur l'éclairage naturel.

Nous avons pu établir à travers les outils de simulation inverse que l'utilisation des intentions d'ambiance de lumière naturelle peut être considérée comme l'information principale à utiliser par une méthode et un outil d'assistance à la conception pendant les phases préliminaires du projet. Et l'accès à des références architecturales peut être une aide pour exprimer une intention d'ambiance lumineuse. La présence d'une base de données des bâtiments de référence, accessible lors de l'expression des intentions d'ambiance lumineuse, peut amorcer une aide à l'expression des intentions.

Selon Gérard HEGRON les deux approches de modélisation, l'une impérative et l'autre déclarative, ne sont en définitif pas exclusives l'une de l'autre. Elles traduisent chacune un langage de représentation, l'un de la forme et l'autre de ses effets, qu'il convient d'employer pour des modes de pensée et d'action appropriés, l'un de conception et l'autre de construction.

On peut constater que la simulation inverse n'est pas encore intégrée aux logiciels grand public, ni même à ceux réservés aux architectes. La simulation inverse est une méthode de conception qui se trouve encore entre les mains des chercheurs.

LA DEUXIÈME PARTIE :

CHAPITRE V : STRUCTURE ET MÉTHODOLOGIE DU
MODÈLE

*" Notre créativité et notre imaginaire se construisent à partir de toutes les choses que nous connaissons, que nous avons vues ou appréhendées. Nous avons besoin de nourrir notre esprit de références existantes pour imaginer de nouvelles choses ".
G. Lassance*

IV. INTRODUCTION

Dans le projet architectural, l'ambiance lumineuse dont le support physique est l'éclairage naturel, Il est le résultat de l'interaction entre la lumière naturelle et le bâtiment. Celui-ci est souvent considéré comme un filtre et un guide pour la distribution de cet élément vital qui est la lumière naturelle à l'intérieur de l'espace architectural vécu.

Le concepteur doit réfléchi, dès les premières phases d'esquisses, à adopter l'ambiance lumineuse la mieux appropriée à l'espace qu'il est en train de concevoir. Il doit aussi penser aux dispositifs qu'il va utiliser pour créer dans cet espace l'ambiance voulue. Pour cela, le concepteur fait appel à des références internes et externes qu'il exprime ensuite sous forme d'intentions. Dans le but de comprendre les intentions d'ambiances lumineuses des architectes, plusieurs méthodes et outils ont été développées afin d'assister à la formulation de cette dernière tout au long du processus de conception. Le problème posé, lors de la conception par l'intention d'ambiance, est de trouver la configuration spatiale qui puisse créer l'éclairage souhaité (Tourre, 2007). Pour atteindre cet objet, nous avons fait le choix de l'approche inverse comme contexte dans lequel on essayera d'introduire un modèle d'assistance à la conception de l'ambiance lumineuse. A partir de cette constatation et en se référant aux travaux de caractérisation de la lumière naturel présentés par Chaabouni (2011), Cervantèse (2012), Gallas (2013) et Daïche (2015), on va définir durant le présent chapitre les différentes étapes que notre modèle doit comporter pour aboutir à un tel résultat. Ainsi, on va proposer des solutions aux besoins et aux questions posées pour chaque étape auquel le modèle doit répondre.

La première partie de ce chapitre abordera la phase de déclaration de l'intention d'ambiance lumineuse à la base des images photographiques des salles de classe des établissements scolaires classées « HQE ». De ce fait, on va procéder au recueillement des données nécessaires à l'identification, caractérisation des ambiances lumineuses contenant dans ces images en utilisant la méthode de Demers. La deuxième partie du chapitre sera consacrée à la génération des propositions architecturales répondant aux intentions des concepteurs. Cela

a été rendu possible par l'intégration du modèle MNSIEN développé par Daiche (2015) ce qui nous a permis de produire des solutions pour les systèmes d'éclairage.

V.1. la phase de déclaration de l'intention

V.1.1. Image photographique comme outil d'aide à la déclaration de l'intention d'ambiance lumineuse

La déclaration des intentions a une double fonction : une première de création et de génération d'idées et intentions et une deuxième servant à les formaliser et à les décrire (Chaabouni, 2011). Comme nous avons vu précédemment que les architectes de la lumière ont formulé leurs intentions en rapport particulier à des considérations usagères et esthétiques. Ces préoccupations peuvent porter sur la qualité de distribution de la lumière, le choix des dispositifs, les effets de la lumière. La conception par l'intention d'ambiance est basée sur le vécu, mais elle peut aussi se baser sur des références architecturales. L'accès à des références architecturales peut être une aide pour exprimer une intention d'ambiance lumineuse. La présence d'une base de données des bâtiments de référence, accessible lors de l'expression des intentions d'ambiance lumineuse, peut amorcer une aide à l'expression des intentions (Tourre, 2007).

L'usage de photographie d'ambiances lumineuses aide à la déclaration de l'intention (Gallas, 2013) ; Elle est considérée comme une image documentaire et utilitaire (Chaabouni, 2011). Lorsque l'architecture est construite, sa diffusion est largement assurée par des images photographiques. Ces dernières apparaissent comme moyen de restitution de la présence des bâtiments. On peut même dire que c'est grâce à elles que les bâtiments se « déplacent » et sont portés à la connaissance de ceux qui ne l'ont pas visités (Chaabouni, 2011).

Ces données nous a conduit à utiliser un langage visuel à base d'images de références. Ces images représentent des configurations architecturales des salles de classe des établissements scolaires de HQE portant une attention particulière à la lumière naturelle. Elles constituent une première interprétation formelle et matérielle d'une idée ou d'une intention que le concepteur a déjà imaginée et qu'il cherché à formaliser (Chaabouni, 2011). Pendant cette phase, le besoin des concepteurs est de s'approprier la ou les références sélectionnées en dégagent de nouvelles connaissances sur l'ambiance lumineuse afin de construire une représentation mentale de l'objet à concevoir et, ce faisant, le développement d'intentions de conception.

Ce ne sont pas les références en tant qu'information qui doivent être mises en avant, mais les moyens donnés aux concepteurs pour les interpréter. Ceci nous a d'ailleurs orientées vers l'indexation sémantique des images en utilisant un thésaurus dédié aux ambiances lumineuses développé par Chaabouni (2011). Nous avons alors d'en extraire des morceaux de connaissances pour les réarticuler en utilisant la méthode de Demers afin de décrire des ambiances lumineuses représentées ;

On va essayer tout au long de cette partie, d'identifier les classes d'ambiance lumineuse ensuite caractériser et Indexer des ambiances lumineuses représentées dans les images de notre corpus. La finalité de cette phase est la sélection d'une ou plusieurs images références. Pour cela, le concepteur doit localiser à travers toutes les images contenues dans la base de références celles qui lui suggèrent des idées qu'il juge potentiellement pertinentes et probables pour résoudre son problème de conception. Le but n'est pas d'apporter une aide au concepteur pour maîtriser les ambiances lumineuses dans toute leur complexité, mais de penser et de composer avec la lumière en créant des ambiances à la fois créatives et génératrices de confort.

V.1.2. Limites de l'image photographique comme support à l'étude des ambiances lumineuses

Selon Chaabouni (2011) ces limites peuvent se rapporter :

- Aux choix du photographe : les photographes interprètent à sa façon le réel qui s'offre à eux. Ils cherchent à donner la meilleure représentation de l'espace photographié et à produire de « belles photos ».
- A la variabilité de la lumière : la lumière varie selon le moment de la journée, de l'année et du type du ciel ou encore selon la situation géographique du bâtiment et l'orientation des prises de jour.
- Situation géographique du bâtiment et orientation des prises de jour : ce sont des données qui influencent fortement le choix des dispositifs (choix de l'ouverture, choix du type de protection, ...). Par exemple, une orientation nord nécessite des dispositifs différents d'une orientation sud. Cependant, ces informations ne sont pas lisibles sur l'image, mais peuvent parfois être déduites à partir des données fournies sur la réalisation représentée.
- A l'authenticité des conditions lumineuses : d'autres paramètres peuvent influencer le rendu de l'éclairage naturel illustré sur la photographie. Par exemple, par rapport à la quantité de la lumière, l'utilisation du flash ou non ou s'il a ajouté

des lumières supplémentaires lors de la prise de la photo. De plus, les performances de l'appareil photo peuvent influencer le rendu des couleurs sur l'image.

V.1.3. les caractéristiques et le choix du corpus

V.1.3.1. Sélection des images références

Les images références doivent assurer les critères suivants :

- ✓ Des salles de classe construites dans une démarche environnementale HQE : parmi ces bâtiments, nous avons orienté notre choix principalement vers ceux où la lumière apparaît comme une occupation formulée par le concepteur.
- ✓ Ces réalisations peuvent être celles d'architectes moins connus, mais qui demeurent intéressantes du point de vue des ambiances lumineuses créées. À travers ces choix, nous ne cibons pas uniquement des réalisations exemplaires ou remarquables, mais aussi celles qui sont parfois jugées ordinaires ou « moins connues » afin de constituer un corpus suffisamment varié et riche.
- ✓ une lecture claire de l'effet ou de l'association de plusieurs effets représentés par l'image : les effets de lumière doivent être clairement identifiables sans effort particulier de la part de l'observateur. Cet objectif suppose une focalisation de l'image sur l'effet de lumière qui doit être le seul centre d'intérêt présent et occupant la majeure partie du cadre de vue.



Figure V.88: lycée hôtelier Georges Frêche (source : <http://projets-architecte-urbanisme.fr>)

La lumière contrasté, taches solaires, contours nets

- ✓ une lecture spatiale de la lumière naturelle : l'image doit représenter clairement la source de lumière, son mode de projection et de propagation dans l'espace architectural intérieur et l'aspect qu'elle donne aux différentes surfaces.

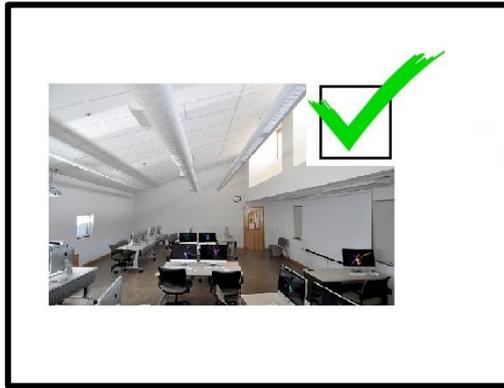


Figure V.90 : Haywood Community College
(Source: www.hpbmagazine.org)

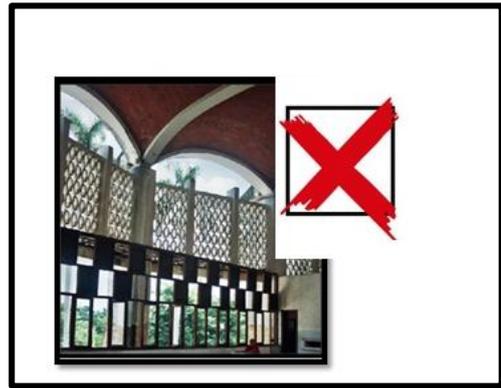


Figure V.89 : School of Fine Arts,
Havana. Ricardo Porro (source:
www.lindmanphotography.com)

- ✓ une neutralité dans la représentation en évitant tous les types d'obstacles physiques qui gênent la lecture et l'appréciation des effets de lumière. Ces images doivent intégrer des effets de lumière naturelle sans aucune influence de type lumière artificielle ou éclairage d'appoint pour la prise de photographie. Les images ne doivent pas avoir subi de post traitement de type modification des niveaux de luminosité et de contraste ou d'application d'effet de style ou de filtre.



Figure V.91 : Salle de classe finlandaise
(source : <http://sydologie.com>)

V.1.3.2 Présentation du corpus

On a fait recours à des ouvrages et des sites d'internet pour la détermination des éléments du corpus, qui sont liés à l'architecture scolaire de HQE dont la lumière naturelle est constitué l'élément de base de la conception de ces bâtiments ; Les salles de

classe constituent notre corpus sont au nombre de 50 images de 39 projets. Toute cette variété des sources nous aide à avoir un corpus représentatif des salles de classes. Les éléments de corpus sont recueillis des ouvrages et des revues suivants :

- **1. Daylighting ; natural light in architecture** (Derek Philips, 2004)

L'ouvrage de son auteur Derek Philips traite la lumière naturelle dans la conception du bâtiment. Ces projets se démarquent dans leur façon de répondre et apprendre à intégrer la lumière du jour dans un large éventail de types de bâtiments de conception avec des études de cas internationales, y compris des exemples du Royaume-Uni, à Hong Kong et aux USA. L'étude des bâtiments scolaires proposées dans cet ouvrage a été démontré que la lumière naturelle à jouer un rôle stratégique majeur dans le développement de la conception d'un bâtiment.

- **2. Architecture et apprentissage 55 établissements d'enseignement exemplaires** (OECD⁴⁷, 2000) et **Compendium of exemplary educational facilities 3rd Edition** (OECD, 2006)

Le premier ouvrage est une compilation consacrée à des bâtiments scolaires et universitaires d'exception représentant 21 pays. Photographie en quadrichromie et textes descriptifs illustrent 55 établissements sélectionnés par un jury international pour la qualité de leur adaptation à un environnement qui est en constante évolution tant du point de vue de l'enseignement que de celui de l'apprentissage. Dans cet ouvrage le jury a cherché des équipements procurant une sensation de bien-être, qualité essentielle et insaisissable. Le bien-être provient de la relation entre les bâtiments et le paysage environnant, du choix des matériaux, des formes et des proportions de l'édifice, de la subtile modulation des couleurs, de la lumière et de l'acoustique (Hacker, 2000). A travers des exemples du monde entier, il montre comment la conception, l'utilisation et la gestion des bâtiments et des terrains scolaires améliorent l'enseignement et l'apprentissage. Les établissements qui ont été sélectionnés ne sont pas nécessairement les meilleurs, mais tous offraient des réponses imaginatives dans un ou plusieurs des domaines d'intérêt retenus (Hacker, 2000).

Le deuxième ouvrage dispose d'établissements d'enseignement de 20 pays sélectionnés par un jury international pour leurs installations exemplaires. Ce travail porte sur la façon dont la conception, l'utilisation et la gestion de l'infrastructure physique peuvent contribuer à la

⁴⁷ The Organisation for Economic Cooperation and Development

qualité de l'éducation. Avec des photographies en couleur, des plans et des descriptions, le Compendium se concentre sur la fonctionnalité de 65 bâtiments ou terrains récemment achevés ou rénovés, choisis pour leur innovation dans les domaines de la sécurité, la durabilité, financement alternatif, les besoins de la communauté et de la flexibilité.

3. Sustainable School Architecture: Design for Elementary and Secondary Schools,xddjddj (Lisa Gelfand & Eric Corey Freed), 2010

Cet ouvrage met l'accent sur les liens entre les meilleures pratiques durables et les besoins spécifiques des établissements d'enseignement. A dix-neuf études de cas internationales des meilleures écoles contemporaines durables situées dans les communautés urbaines, suburbaines et rurales dans les zones de climat tempéré, tropical, et extrêmes. Contient de précieuses informations sur la collaboration Californie pour High Performance Schools (CHPS) et le Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) du système de notation. Cet ouvrage est un guide pour la planification, l'architecture et la conception des écoles qui sont sains, stimulants, et économiser de l'énergie et des ressources. Écrit avec les besoins des architectes, professionnels de la construction, des éducateurs, et l'administration scolaire à l'esprit, le livre fournit une feuille de route pour la planification durable, la conception, la construction et les opérations.

- **4. Daylight in School Classrooms Bruce Coldham, (AIA, 2003)**
- **5. Daylighting and Human Performance. GROUPE HESCHONG MAHON. Ed. Pacific Gas and Electric Company, U.S.A, Juin 1999, p 64**
- **6. L'architecture écologique UE développement durable Licence 3 génie civil université la rochelle. (LEROY Arnault, 2005)**
- **7. Architecture scolaire : Exposé de Simone Forster**

Tableau V.14 : les projets choisis pour le corpus (source : auteur)

N°	Projet	Architectes	Année
Allemagne			
1	Salmtal Secondary School Canteen	SpreierTrenner Architekten	2012
Australia			
2	Canning Vale College	HASELL	2004
Bangladesh			
3	School of Rudrapur	Anna Heringer	2006
Canada			
4	Pavillon des arts visuels et du design	Patrice Beauchemin et Élisabeth Bell-Nadeau	2010

Colombia			
5	La Leroteca	Lacaja Arquitectos	<u>2013</u>
Copenhagen, Denmark			
6	Collège Oreastad	3XN Architects Kim Herforth Nielsen, Bo Boje Larsen, Kim Christiansen	2006
Finlande			
7	Råå day care center	Morte Mandrup Mrkitekter	2014
8	School of The Hague	Hans Goverde, Annemiek Bleumink, Laurence Meulman, Patrick Keijzer en Nol van den Boer	2010
9	Hosmarinpuisto School and Day Care Centre	Yrjö Suonto	2005
France			
10	lycée hôtelier Georges Frêche	Massimiliano Fuksas	2012
11	Groupe Scolaire Henri WALLON	Thomas Teissier	2012
12	Ecole maternelle du centre, France	Paul le Querenc Architect	2006
13	Le Lycée professionnel, Albert Camus, à Fréjus.	Foster & partners	1991
14	l'école Saint-Jean	Dominique Coulon & associés	2013
15	l'école d'Unité d'habitation	Le Corbusier	1967
16	L'école maternelle et Ateliers Municipaux	Jean François Schimt	2010
17	Sarreguemines Nursery	Michel Grasso + Paul Le Quernec	2011
18	Bailly School Complexe	Mikou Design Studio	2009
19	Collège de l'Esplanade	Pascal de Benoit & Martin Wagner	2003
20	Groupe scolaire Joséphine-Baker	Domminique Coulon & associés	2010
Indonisie			
21	Green School	US Green Building Council	2008
Ireland			
22	Loreto Community School	P.H.McCarthy	2006
Pays- Bas			
23	Elementry school complex at Techum	Yushi Uehara / Zerodegree Architecture	2009
Sénégal			
24	Lycée français Jean MERMOZ	Atelier « Efficacité énergétique des bâtiments en zone tropicale	2006
UK			

25	Fawood Children's Centre	Alan Lai, Alsop Design Ltd	2004
26	Micheal Farady community school	Alsop Sparch	2010
27	James' School	London firm Squire and Partners	
28	Kingsmead Primary School	Craig White, White Design Associates Ltd.	2004
USA			
29	The East Harlem School	GLUCK+	2008
30	Portland Community College Newberg Center	Hennebery Eddy Architects	2012
31	Haywood Community College Creative Arts Building	Clyde, N.C.	2013
32	Chemeketa Community College	Sam Stadler, AIA	2013
33	Students Union, University of Warwick	Architect Casson Conder	
34	City Learning Centre, Bristol	Architect Alec French Partnership	2001
35	the Kathleen Grimm School	SOM designs first net-zero energy	
36	Ben Franklin Elementary School	Mahlum Architects	2006
37	The Machias Elementary School's	NAC Architecture.	2012
38	Andrew H. Wilson Elementary Elementary School	HMS Archites	2008
39	Loyola Elementary Schools	Gelfand Partners Architects	

L'organisation du corpus d'images photographiques implique un travail d'indexation de ces images. Cette activité permet de structurer les références et de les rendre accessibles.

V.1.4. Identification, caractérisation et Indexation des ambiances lumineuses

V.1.4.1. Identification des ambiances lumineuse

Une fois notre corpus a été constitué, nous avons constaté qu'une ambiance lumineuse a besoin d'être analysée sous plusieurs aspects. Notre but était d'identifier un vocabulaire uniforme et suffisamment commun dans la caractérisation des ambiances lumineuses ceci nous a d'ailleurs orientées vers l'étude de Chaabouni (2011). Cette dernière nous a permis de connaître le vocabulaire manipulé par les architectes. Elle a introduit un thésaurus en cinq aspects différents : dispositifs lumineux, surfaces intérieures, quantité de lumière, usages et classe d'ambiance. Dans ce qui suit, nous aborderons particulièrement ces aspects en

ajoutant la notion du patron (c'est la combinaison de trois paramètres : dispositifs lumineux usages et classe d'ambiance) par rapport à la manière de les décrire et les termes utilisés.

1. **La facette « dispositifs lumineux »** Cette facette comprend les dispositifs de transmission de la lumière et les dispositifs de protection et de contrôle.

Tableau V.1 : La facette « dispositifs lumineux »

les dispositifs de transmission de la lumière	les dispositifs de protection et de contrôle
<p>Éclairage second jour</p> <ul style="list-style-type: none"> Second jour latéral Second jour zénithal <p>Éclairage global</p> <ul style="list-style-type: none"> Éclairage global transparent Éclairage global translucide <p>Éclairage zénithal</p> <ul style="list-style-type: none"> Fenêtre de toit Ouverture ponctuelle <p>Ouvertures multiponctuelles</p> <ul style="list-style-type: none"> Fente zénithale Plusieurs fentes zénithales Verrière zénithale Ouverture sur toute la Surface du plafond translucide Atrium Puits de lumière Shed Lanterneau Voûte Coupole Autre ouverture zénithale <p>Éclairage latéral</p> <p>Type d'ouverture</p> <ul style="list-style-type: none"> Ouverture sur toute le mur Fenêtre Bandeau lumineux Porte vitrée/porte fenêtre Fente verticale Fente horizontale Plusieurs fentes verticales Plusieurs fentes horizontales Baie vitrée Baie vitrée de forme irrégulière 	<p>Masque extérieur</p> <ul style="list-style-type: none"> Végétation Bâtiment voisin <p>Éléments architecturaux</p> <ul style="list-style-type: none"> Brise soleil vertical Brise soleil horizontal Claustra Pergola Avant toit Autre élément <p>Protection ajoutée à l'ouverture</p> <ul style="list-style-type: none"> Protection extérieure Protection intérieure Protection translucide fixe Protection translucide mobile Protection opaque fixe Protection opaque mobile Protection ajourée fixe Protection ajourée mobile

Éclairage d'angle Ouverture ponctuelle Ouvertures multiponctuelles Lucarne Autre ouverture latérale Emplacement Éclairage latéral haut Éclairage latéral bas Éclairage sur tout mur Type matériau de transmission Vitrage coloré Vitrage translucide	
---	--

2. La facette « quantité de lumière » Deux aspects différents doivent être pris en compte dans la description de la quantité de lumière : celui relatif à la perception de l'aspect lumineux général de l'espace représenté et celui relatif à la distribution de la lumière.

Tableau V.2 : La facette « quantité de lumière »

Aspect lumineux général de l'espace	Distribution de la lumière
Espace très lumineux Espace lumineux Espace sombre Espace très sombre	Éclairement homogène Éclairement à faible contraste Éclairement à fort contraste

3. La facette « surfaces intérieures » Cette facette concerne les caractéristiques de traitement des surfaces intérieures en couleur et en texture.

Tableau V.15 : La facette « surfaces intérieures »

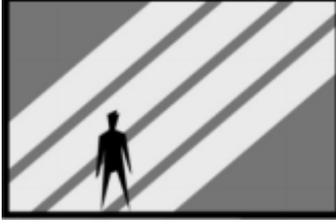
Couleur	Texture
Blanc Plancher blanc Plafond blanc Murs blancs	Texture matte

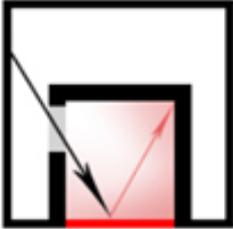
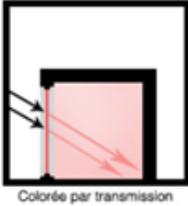
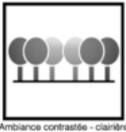
<p style="text-align: center;">Clair</p> <p style="text-align: center;">Plancher clair Plafond clair Murs clairs</p>	<p style="text-align: center;">Plancher mat Plafond mat Murs mats</p>
<p style="text-align: center;">Sombre</p> <p style="text-align: center;">Plancher sombre Plafond sombre Murs sombres</p>	<p style="text-align: center;">Texture brillante</p> <p style="text-align: center;">Plancher brillant Plafond brillant Murs brillants</p>
<p style="text-align: center;">Globalement</p> <p style="text-align: center;">-Espace de couleurs monochromes et homogènes -Espace de couleurs contrastées - Espace tout blanc</p>	

4. La facette « classe d’ambiance » pour cette facette nous avons essayé de regrouper des différentes classes d’ambiance selon les travaux (Chaabouni, 2011), (Gallas, 2009), (Gallas, 2013) et (Cervantès, 2012). Afin d’en représenter un plus grand nombre. Le tableau V.3 représente les icônes décrivent les différentes ambiances de manière assez large, afin que le concepteur puisse, avec ses mots, ou en un coup d’œil reconnaître celle qu’il imagine pour son projet.

Les types d’ambiances pré existantes décrivaient la majorité des ambiances auxquelles nous pouvons être confrontés. Seule la classe supplémentaire « Ambiance inondée » a pu être trouvée car les nouvelles ambiances étudiées appartenaient toujours à l’une ou l’autre des classes, parfois même à deux ou trois. Les classes ont cependant été divisées en sous-classes, ce qui a permis d’isoler quelques phénomènes lumineux afin de mieux les décrire et de préciser les intentions du concepteur. La classe d’ambiance lumière colorée ne peut être indexée au même niveau que les quatre autres classes car la lumière peut être colorée dans toutes les configurations. Ce n’est pas une classe supplémentaire mais plutôt une précision qui peut être ajoutée à toutes les classes d’ambiance. Les mots clefs sont importants dans l’indexation car ils représentent pour chaque image appartenant à une classe d’ambiances lumineuses les catégories ou les mots les plus fréquemment utilisés lors de l’indexation (Cervantès, 2012).

Tableau V. 16 : La facette « Classe d'ambiance »

Les classes d'ambiance lumineuse	Schéma représentatif	Caractérisation des classes
<p>La lumière uniforme</p>		<p>Mots clef : espace lumineux, très lumineux ou sombre, éclairage homogène, espace de couleurs monochromes ou homogènes, la lumière unifie l'espace, espace tout blanc, mur transparent, éclairage sur toute la hauteur du mur, bandeau lumineux/fenêtres en bandeau.</p>
<p>La lumière rasante</p>		<p>Mots clef : jeux de tâches solaires, la lumière révèle la structure, la lumière déstructure l'espace, la lumière enveloppe l'espace : effet d'extérieur, espace lumineux ou très lumineux, éclairage contrasté, la lumière divise l'espace, verrière zénithale, mur transparent</p>
<p>La lumière englobante</p>		

<p>L'ambiance inondée</p>		<p>Mots clef : la lumière unifie l'espace, la lumière révèle la structure, espace très lumineux, la lumière enveloppe l'espace : effet d'extérieur.</p>	
<p>La lumière colorée</p>	<p>1-Colorée par réflexion</p>		<p>Mots clef : espace de couleurs contrastées, espace lumineux ou très lumineux, lumière uniforme, lumière homogène.</p>
	<p>2-Colorée par transmission</p>		<p>Mots clef : vitrage coloré, espace lumineux ou très lumineux, la lumière anime l'espace.</p>
<p>La lumière contrastée</p>	<p>Clairière</p> 	<p>1Focalisée sur un élément</p> 	<p>Mots clef : la lumière crée un lieu focal, la lumière crée une attraction, la lumière souligne une direction.</p>
		<p>2Lumière émotion</p> 	<p>Mots clef : la lumière crée une attraction, la lumière divise l'espace, la lumière révèle la matière, espace religieux, espace sombre.</p>
		<p>1contours nets</p> 	<p>Mots clef : espace lumineux, lumière directe ou rasante, plancher mat, ciel dégagé.</p>

	<p>taches solaires</p> 	<p>2Contours diffus</p>  <p>Contour des tâches diffus</p>	<p>Mots clef : plancher brillant, lumière indirecte ou diffuse, ciel couvert.</p>
	<p>Fond de pièce</p>		<p>Mots clef : mur transparent, bandeau lumineux/fenêtres en bandeau, fente horizontale, éclairage latéral haut, bas ou sur toute la hauteur du mur</p>

Les patrons d’ambiance

5. La facette du « Patron »

Comme nous avons vu précédemment que la notion de classe était trop restrictive pour identifier une ambiance lumineuse et comment la notion de patron a semblé être plus pertinente (Cervantès, 2012). Nous allons maintenant nous intéresser aux exemples de patrons d’ambiances que nous avons commencé à développer afin d’exemplifier notre proposition. Nous avons utilisé des icônes proposées par Cervantès (2012) représentant la plupart des dispositifs utilisés et des différentes classes d’ambiances lumineuses des salles de classe dont nous avons eu besoin pour illustrer les patrons et nous nous sommes servis de la manière de Cervantès (2012) pour les décrire.

Pour chaque patron, nous avons regroupé les images où figurés des espaces ayant des dispositifs identiques. Nous les avons positionnées dans un tableau, chaque tableau étant un début de proposition de classification des images dans les modèles de patron d'ambiance. Cette classification des images pour chaque patron permet d'aborder l'ambiance lumineuse de plusieurs manières (par l'effet, l'ambiance ou le dispositif).

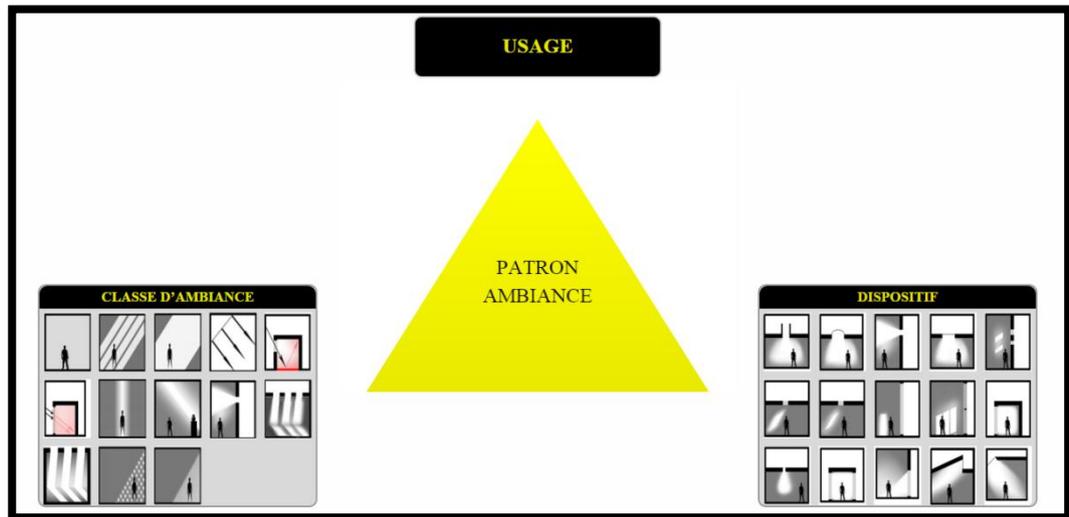


Figure V.92 : type de classification pour le patron salle de classe (source : auteur)

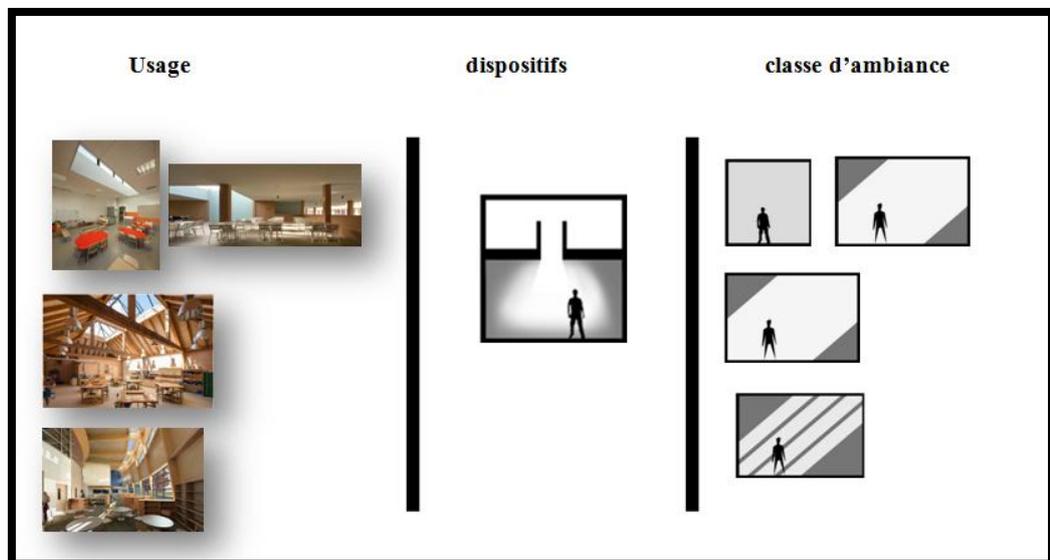


Figure V.93 : Patron d'ambiance (source : auteur)

V.1.4.2. Essai de caractérisation de l'ambiance lumineuse identifiée à la base des images photographiques par la méthode de Demers

Pour indexer les images de notre corpus et afin que le concepteur puisse clairement identifier et caractériser les ambiances lumineuses représentées. Et voir les mots clés proposés par

Cervantès (2012) aux différentes ambiances, nous allons essayer de trouver des valeurs qui peuvent servir à qualifier les différentes ambiances afin de tenter de les caractériser. Nous verrons si cette tentative a été pertinente et à quelles conclusions celle-ci nous a menés. Les ambiances lumineuses recherchées étaient celles des images et non l'ambiance réelle du lieu. Le concepteur se basera sur ce qu'il voit c'est à dire sur l'image qu'il a devant les yeux.

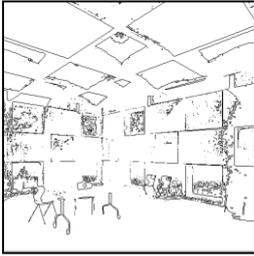
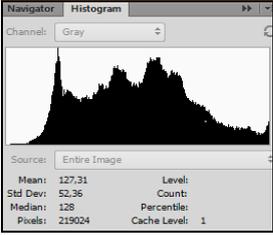
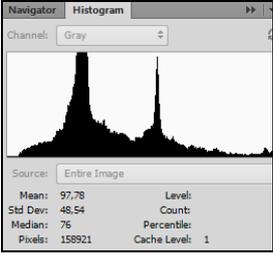
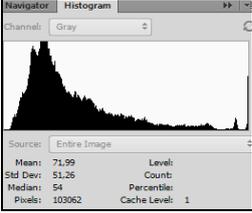
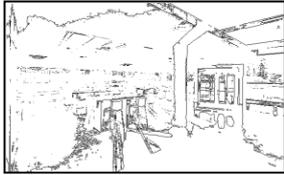
De ce fait nous avons choisi la méthode de Demers, cette dernière permettant de décrire et de classer des ambiances lumineuses avec plus de précision. Rappelant que cette dernière basée sur le traitement numérique des images par le logiciel **Photoshop**®. Cette recherche se base principalement sur une méthode qui intègre le **contraste** et la **luminosité** afin de permettre un classement lumineux qualitatif et quantitatif de l' image.

Après avoir appliqué la méthode d'évaluation qualitative et quantitative élaborée par Demers et observations visuelles des images photographique de notre corpus. Elle permet ainsi de fournir aux architectes des informations qui peuvent les aider à mieux intégrer la lumière naturelle dans leurs projets des bâtiments scolaires, dès la phase amont du projet de conception.

Nous allons essayer d'interpréter les résultats obtenus. En premier lieu, nous présentons les interprétations pour chaque image, ensuite en guise de conclusion nous comparons entre les différentes images constituant notre corpus. Avec les deux mesures (contraste et brillance), il est possible d'obtenir une courbe de répartition des ambiances lumineuses (les Graphes) utile pour classer les images. Elle permet donc de qualifier sommairement une image de « sombre », lorsque le pourcentage de (Mean) est faible (0-50%) et de « claire » lorsqu'il est élevé (50-100%). L'écart type (Std Dev) indique le degré de contraste global d'une image. Un écart-type élevé équivaut à une image contrastée, les valeurs des pixels étant dispersées de part et d'autre de la valeur gris moyenne (Demers, 1997). Il permet ainsi de qualifier globalement une image de « faiblement » ou de « fortement » contrastée.

L'analyse effectuée sur les autres images du corpus est exposé au chapitre à l'annexe

Tableau V.17 : les images traitées selon la méthode de Demers (source : auteur)

Image	Niveau du détail	Position du motif dominant	Graduation de lumière
<p>Image 1</p>  <p>Salmtal Secondary School Canteen</p>	 	 <p>Mean : 50% Std : 20.53%</p>	 <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre (zone d'ambiance lumineuse moyenne) espace lumineux. Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 1).</p>
<p>Image 2</p>  <p>Canning Vale College</p>	 	 <p>Mean : 38.34% Std : 19.03%</p>	 <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre (zone d'ambiance lumineuse moyenne). Espace moyenne sombre Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 1)</p>
<p>Image 3</p>  <p>School of Rudrapur</p>	 	 <p>Mean : 28.23% Std : 20.10%</p>	 <p>la majorité des pixels est localisée à l'extrémité gauche de l'histogramme (la zone d'ambiance sombre). Espace très sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 1)</p>
			

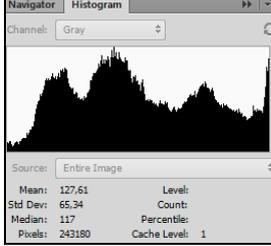
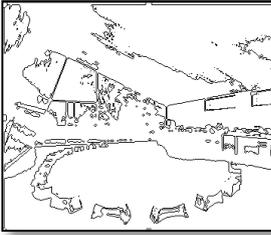
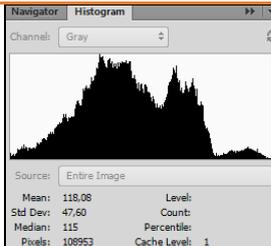
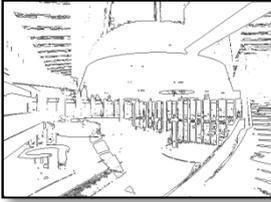
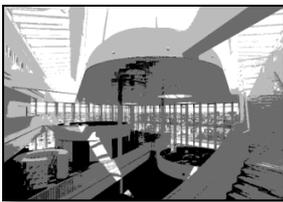
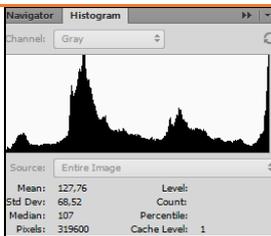
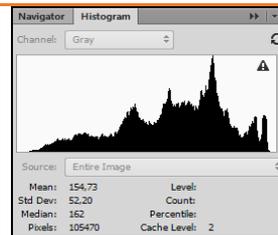
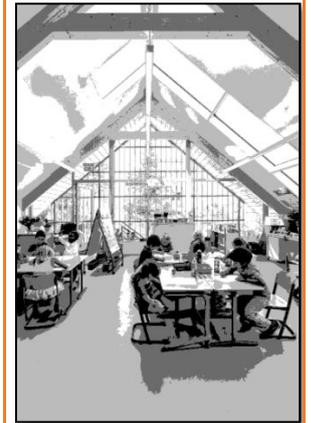
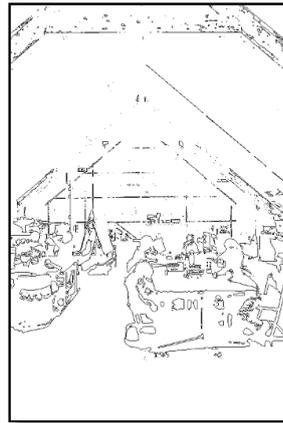
<p>Image 4</p>  <p>Pavillon des arts visuels et du design</p>	 <p>Mean : 127.61 Std Dev: 65.34 Median: 117 Pixels: 243180</p>	<p>Mean : 50.04% Std : 25.26</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace lumineux Image se trouve dans la zone supérieure forte contraste (voir Graphe 1).</p>
<p>Image 5</p>  <p>La Leroteca</p>	    <p>Mean : 118.08 Std Dev: 47.60 Median: 115 Pixels: 108953</p>	<p>Mean : 46.29% Std : 18.66%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 1).</p>
<p>Image 6</p>  <p>College Oreastad</p>	    <p>Mean : 127.75 Std Dev: 68.52 Median: 107 Pixels: 319600</p>	<p>Mean : 50.10% Std : 26.87%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace lumineux Image se trouve dans la zone supérieure forte contraste (voir Graphe 1).</p>

Image 7



School of The Hague



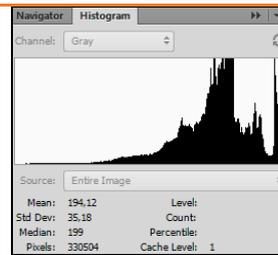
Mean : 60.67%
Std : 20.47%

L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace lumineux Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 1).

Image 8



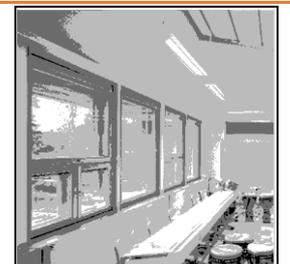
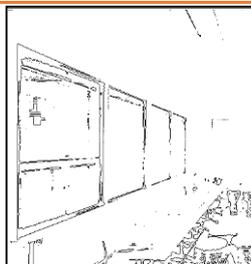
Råå day care center

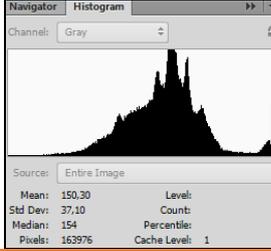
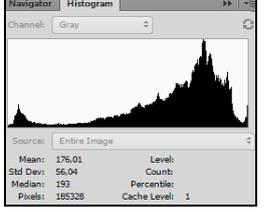


Mean : 76.12%
Std : 13.79%

la majorité des pixels est localisée à l'extrême droite de l'abscisse zone d'ambiance lumineuse claire. Espace très lumineux. Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 1).

Image 9



<p>Hosmarinpuisto School and Day Care Centre</p>		<p>Mean : 58.94% Std : 14.54% L’histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l’image car la majorité des pixels est localisée au centre. Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 1).</p>
<p>Image 10</p>  <p>lycée hôtelier Georges Frêche</p>		 
	<p>Mean : 69.02% Std : 21.97% la majorité des pixels est localisée à l’extrême droite de l’abscisse (zone d’ambiance lumineuse claire). Image se trouve dans la zone du contraste (voir Graphe 1).</p>	

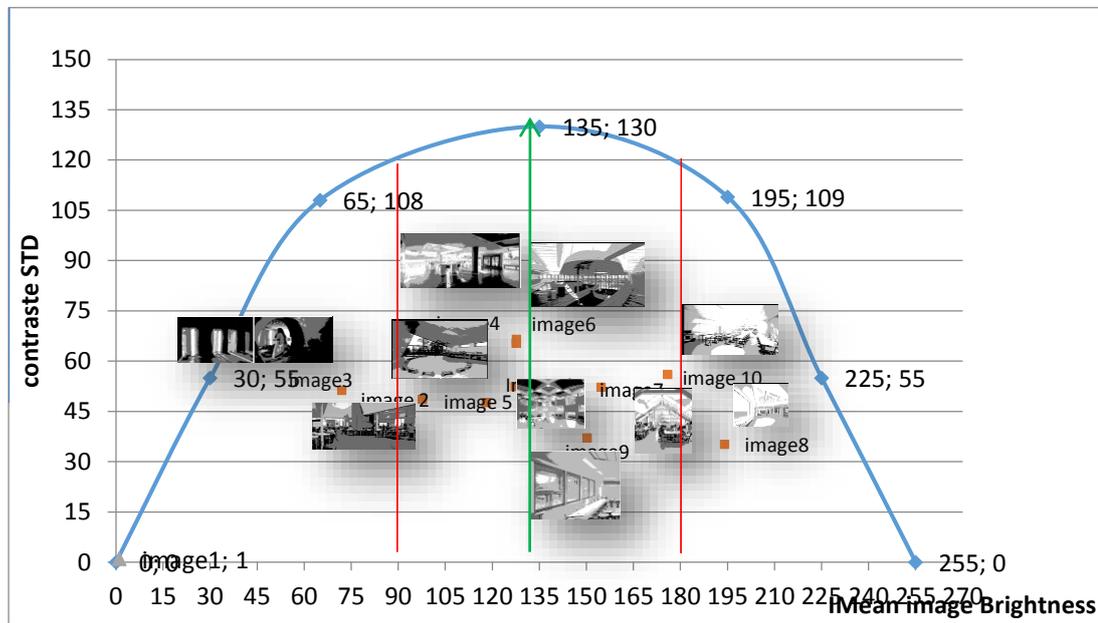
L’analyse quantitative (Graphe 1) montre des niveaux de brillance allant de 28 % (très sombre) à 76% (très claire) et des degrés de contraste est moyen observé sur la majorité des photographies, il s’échelonnant de 35.18 (faiblement contrasté) à 58.52 (contrasté). Nous avons essayé de préciser (0-35%) sombre (35-50%) moyenne sombre (50-70%) moyenne lumineux (70-100%) lumineux.

L’analyse quantitative (voir graphe V.6) signale également la diversité des ambiances lumineuses observées. En général la brillance des photographies est plutôt moyenne, montrant des niveaux de brillance allant de 65% à 195%. Elles sont aussi moyennement contrastées, leurs valeurs variant entre 30 et 90.

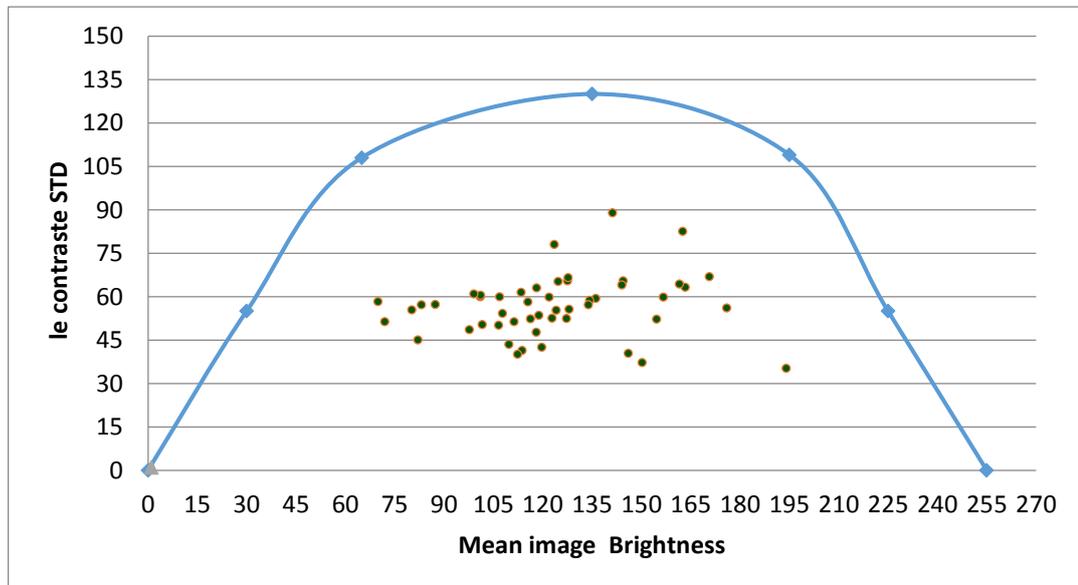
En effet, les environnements faiblement contrastés sont généralement les plus appropriés au travail (Gordon, 2003). Un degré de contraste élevé pourrait d’ailleurs révéler la présence d’une source d’éblouissement, pouvant être particulièrement gênante pour la lecture ou l’écriture.

La façon dont la lumière naturelle est fournie est très donc déterminante de la qualité des milieux scolaires. Les principaux aspects qui font la qualité de ces espaces sont la souplesse et l’adaptabilité. Ils sont conçus comme un vecteur de bien-être, des lieux d’identification,

des lieux qui éveillent, qui stimulent et qui engagent les apprenants à être plus assidus, le mobilier scolaire se conçu de manière plus ergonomique et mieux approprié à la morphologie des utilisateurs et à leurs activités.



Graph V.1 : Classification des ambiances lumineuses des images par la relation entre la brillance (moyenne) et le contraste (écart type) (source : auteur)



Graph V.2 : Classification des ambiances lumineuses d'une image par la relation entre la brillance (moyenne) et le contraste (écart type) (source : auteur)

Dans le but de guider une indexation (L'indexation permet de donner des **pondérations**⁴⁸ à chaque mot clé) cohérente de tout le corpus d'images. Les descripteurs doivent être choisis à partir du thésaurus et exclusivement à partir du dernier niveau hiérarchique. Ces différentes descriptions ou représentations des ambiances lumineuses permettent de les imaginer, de les comprendre et parfois même de les ressentir. Des mots simples et précis sont utilisés afin que les différentes atmosphères puissent être ressenties par tous. Chaque image doit être indexée au minimum avec un concept de chaque facette :

- Chaque image illustre au moins un dispositif lumineux.
- Chaque image illustre au moins une quantité de lumière.
- Chaque image illustre au moins un effet de lumière.
- Chaque image illustre au moins une surface intérieure.
- Chaque image doit avoir au moins cinq descripteurs. (voir tableau)

Dans les différentes catégories de classe 50 images sont maintenant indexées dans notre modèle. Cela permet d'homogénéiser le poids de chaque classe et de permettre aux concepteurs de trouver l'effet ou l'ambiance qu'il imagine.

Les tableaux d'indexation effectués sur chaque image du corpus sont exposés au chapitre à l'annexe

⁴⁸ La pondération : l'idée derrière la pondération des termes d'indexation est d'affecter à chaque terme un poids pour traduire son importance dans la description de l'image. (Aitchison and Gilchrist, 1992. Cité par Chaabouni, 2011).

Tableau V.18 : Indexation des images

Nom du projet School of The Hague		Nom du projet lycée hôtelier Georges Frêche	
 		 	
Source de l'image,	http://www.kraaijvanger.nl	http://projets-architecte-urbanisme.fr	
Nom architecte ou groupes architectes	Hans Goverde, Annemiek Bleumink, Laurence Meulman, Patrick Keijzer en Nol van den Boer	Massimiliano Fuksas	
Année de réalisation	2010	2012	
Situation géographique	Wassenaar, Finlande	Montpellier, France	
Dispositifs lumineux	Eclairage latérale,	Eclairage latérale ; baie vitrée de forme irrégulière	
Surface intérieures	Plancher clair murs clair	Espace de couleur contrastée	
Quantité de lumière	Lumineux (faible contraste)	Lumineux (contrasté)	
Effets de lumière	Lumière uniforme	La lumière contrastée ; taches solaires ; contours nets	

V.2. La phase de générations des solutions

La présente partie explique la phase de génération des solutions. Au départ l'utilisateur a utilisé pour déclarer ses intentions, des images correspondant aux cas les plus représentatifs de types d'ambiances lumineuses qu'un concepteur peut rencontrer. Ces derniers seront détaillés pour permettre à l'utilisateur de préciser ses choix à plusieurs niveaux. Le concepteur a le choix entre la classe d'ambiance, dispositifs, ou bien les patrons d'ambiance lumineuse.

Dans le but de trouver des valeurs qui peuvent servir à générer les différentes classes ambiances. En se basant sur les études de Cervantèse (2012), Gallas (2013) sur la caractérisation physique de l'effet de la lumière dans l'espace, ils ont identifié grâce aux simulations obtenues avec Velux Visualizer, des résultats permettent de trouver des similitudes ou d'expliquer certains effets, pourtant leur pertinence reste faible. Ci-après, les résultats de simulation en termes d'éclairement, de luminance et de facteur de lumière du jour :

Pour les ambiances contrastées tâches nettes, rasantes et inondées, le ciel est toujours ensoleillé, l'éclairement et la luminance sont élevés et le facteur de lumière du jour se situe de 8% à plus de 12%.

Pour les ambiances lumière contrastée – rasante, le facteur de lumière du jour se situe entre 8% et 9%. Les valeurs d'éclairement et de luminance sont élevés mais moins que pour l'ambiance contrastée – tâches solaires. L'indice d'ouverture est élevé.

Les espaces éclairés de manière uniforme possèdent un indice d'ouverture assez important, 1/3, voir plus. Les valeurs de l'éclairement, de la luminance et du facteur de lumière du jour peuvent être faibles ou élevés mais sont quasiment constants en tous points de la pièce. Le ciel est souvent couvert.

Pour la lumière contrastée – fond de pièce : le facteur de lumière du jour se situe entre 3% et 6% ce qui est plutôt correct pour des pièces de vie comme une salle de cours. Le niveau d'éclairement moyen est de 100 à 500 lux. Le ciel est souvent couvert.

Les valeurs ont été classées dans le tableau suivant qui a permis de dégager certaines données pour caractériser certaine ambiance.

Tableau V.19 : Tableau des valeurs obtenues à partir des simulations d'éclairage Cervantès (2012).

Classe d'ambiance	Type de ciel	Eclairage	La luminance	FLJ	L'indice d'ouverture est élevé.
uniforme	couvert	faibles ou élevés constants en tous points de la pièce	faibles ou élevés constants en tous points de la pièce	faibles ou élevés constants en tous points de la pièce	un indice d'ouverture assez important, 1/3
rasantes	ensoleillé	élevés	élevés	8% à plus de 9%	
inondées	ensoleillé	élevés	élevés	8% à plus de 12%	
ambiances contrastées tâches nettes	ensoleillé	élevés	élevés	8% à plus de 12%	
la lumière contrastée – fond de pièce	couvert			3% et 6%	

Voir la difficulté de générer une ambiance lumineuse en toute sa complexité. On va reformuler et simplifier l'intention du concepteur afin de satisfaire les contraintes de lumière et les intégrer au processus de design.

Cette étape consiste à générer l'ambiance lumineuse souhaitée à partir des intentions déclarées par le concepteur en termes d'éclairage ; la présente recherche utilise Eclairage comme paramètres statiques capables de créer des effets de lumière naturelle imaginés et décrits par le concepteur pour les interpréter et proposer des solutions architecturales sous forme des surfaces des ouvertures, elle cherche à générer des sources lumineuses latérales qui créent certain dynamisme lumineux.

Dans ce cadre, nous avons intégré le modèle numérique **MNSIEN**⁴⁹ développé et validé par Daiche, M (2015) dans son mémoire de magistère à l'université de BATNA. Ce modèle nous permet la réalisation d'une intention d'éclairage intérieur dans le plan quantitatif par simulation inverse de l'ensoleillement (Daiche, 2015) ; C'est un fichier MATLAB M-file dans lequel s'affiche seulement les données à inclure et les résultats de calcul (on propose

⁴⁹ Le Modèle Numérique de Simulation Inverse de l'Eclairage Naturel

un niveau d'éclairage nécessaire pour effectuer une tâche donnée et on cherche les dimensions de l'ouverture qui permet d'avoir ce niveau d'éclairage sur un point donné). Ce modèle prenait en considération "le ciel et le soleil" comme composantes de l'environnement lumineux extérieur et "l'élément d'ouverture" comme seule source de lumière à l'intérieur de l'espace. L'utilisation de MNSIEN n'influe pas sur la configuration morphique de l'espace ou des éléments d'ouverture « en cours de conception » mais constitue une aide pour la mise en place optimale d'un système d'éclairage basé sur la lumière naturelle (Daiche, 2015).

Le modèle d'espace sur lequel le calcul sera fait est de forme géométrique simple "rectangulaire" pour faciliter la lecture d'orientation, soit un espace de dimensions de : Longueur : 10 mètres, Largeur : 6 mètres, Hauteur : 4 mètres. Ce dimensionnement correspond à celui d'une salle de classe pour une école, lycée, une salle de classe dédiée aux travaux dirigés dans un établissement universitaire ou tout autre lieu d'apprentissage pédagogique et pour les Propriétés photométriques Le sol, les murs et le plafond du modèle choisis sont considérés sans épaisseur et leurs degrés de produire un phénomène optique comme la réflexion, réfraction ou autre sont considérés comme nuls. Le système a besoin d'autres types d'informations (géométrique, valeurs d'éclairage souhaité, des angles...) pour calculer la surface de la fenêtre, interpréter les requêtes de l'utilisateur et générer des solutions.

Les étapes de calcul se déroulent en 2 étapes :

Etape (1) : calcul du flux extérieur Φ_{ext}

Pour le calcul des apports lumineux venus de l'extérieur (ciel + soleil), le modèle utilisé est celui de Richard Kittler. (Kittler, 2002. Cité par Daiche, 2015). Après l'application de séries de formules proposées par Richard Kittler et Stanislav Darula, et la formule de calcul de la luminance zénithale par M, Karayal. A la fin de cette étape, le flux reçu par l'élément d'ouverture sera connu.

Etape (2) : calcul la surface d'ouverture

Le calcul de cette étape se fait par une série de formules réalisées par Vincent Tourre dans sa thèse de doctorat afin de calculer la surface que doit avoir l'élément d'ouverture pour atteindre le niveau d'éclairage voulu,

Insertion des données - Les valeurs d'angles de l'azimut et de la hauteur du soleil correspondant à la date et à l'heure du calcul.

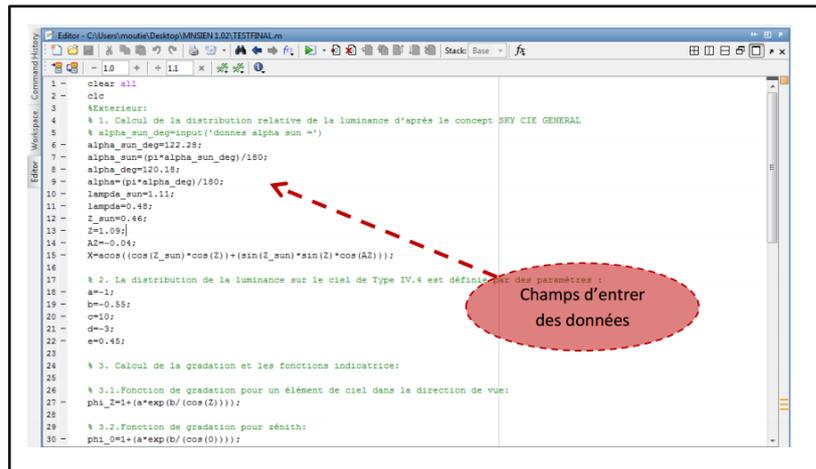


Figure V.94 : Représentation de la page de calcul comme interface utilisateur

(Source : Daiche, 2015)

Visualisation des résultats Après le lancement du calcul, les résultats s’affichent sur la même palette. Cela permet au concepteur de visualiser ces résultats de manière instantanée ce qui contribue à réduire le temps d’utilisation.

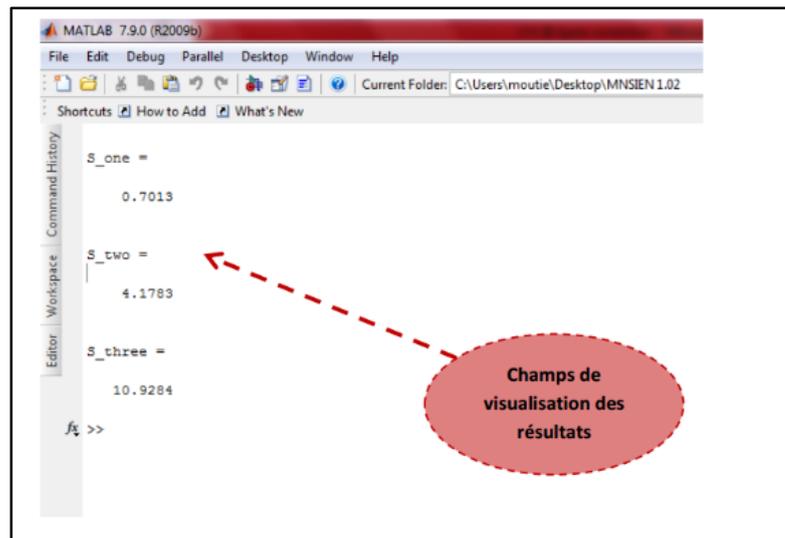


Figure V.95 : Représentation de la page de résultats (source : Daiche, 2015)

V. CONCLUSION

Nous avons essayé de montrer dans ce chapitre la démarche adoptée afin de développer un modèle s'inscrit dans l'approche inverse, en se référant aux travaux de caractérisation de la lumière naturel présenté par Chaabouni (2011), Cervantèse (2012), Gallas (2013), Daiche (2015). Le modèle a été développé en deux phases :

La déclaration de l'intention : L'un des enjeux de cette phase est d'utiliser les images références des salles de classe des établissements scolaires de HQE, à la fois comme moyen de déclarer les intentions du concepteur et comme une source d'information. À partir de ces images nous avons extrait des morceaux de connaissances (quantité / contraste) pour les réarticuler en utilisant la méthode de Demers afin de faciliter l'indexation. A la fin de cette phase le concepteur peut déclarer ses intentions par le biais du mot clé du thésaurus et exclusivement à partir du dernier niveau hiérarchique ou passer par patron ambiance qui permet de mieux cibler le choix du concepteur en éliminant certains paramètres.

La deuxième phase consiste à générer l'ambiance lumineuse souhaitée en reformulant les intentions déclarées par le concepteur en termes d'éclairage, elle se caractérise par l'intégration du modèle développé par Daiche (2015) afin de générer des réponses architecturales sous forme des surfaces des ouvertures,

Cette stratégie fournit un outil hybride ayant pour but d'associer des impressions lumineuses à la fois quantitatives liées au calcul d'aider un architecte à dimensionner les ouvertures de son projet et qualitatives, liées à la déclaration des intentions à travers des classes d'ambiance, des dispositifs ou bien des patrons d'ambiance. Cette particularité hybride de l'outil développé supporte donc le concepteur pour associer un aspect sensible lié à l'ambiance lumineuse souhaitée dans son processus de design.

L'évaluation du potentiel que peut apporter notre modèle et son niveau d'adaptation à un contexte de conception réel nécessite son implémentation dans un outil. Ce dernier intégrera des modules logiciels capables de retranscrire l'ensemble des phases, des tâches et des activités qui caractérisent le processus du modèle que nous avons défini.

CHAPITRE VI : ENVIRONNEMENT DU
DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE STRATÉGIE
LOGICIELLE

« Réaliser une idée, en effet, ce n'est ni l'illustrer, ni l'évoquer, ni même la donner à voir ; c'est bien plutôt, d'une même opération, lui donner une exposition sensible et la construire, la générer, la concevoir, poursuivre son développement, la finaliser. »

Daniel PAYOT, Le philosophe et l'architecte, Aubier, 1982.

VI. INTRODUCTION

Dans le précédent chapitre, nous avons défini la stratégie par la façon dont notre modèle a été structuré. Dans le but de tester notre modèle et le confronter avec la réalité, on va proposer une maquette virtuelle, montrant les différentes étapes du processus, son mode opératoire ainsi que les types de résultats obtenus. L'interface proposée et le mode de fonctionnement respectent les objectifs de départ, à savoir une adaptation aux premières phases de conception.

En s'inspirant du system Day@mbiance développé par Chaabouni (2011) et le module logiciel, Image, développé par Pascal Humbert afin d'implémenter notre modèle « **AD-light version 1.0.** » Ce dernier est un ensemble de page WEB interactif implémenté dans un module logiciel de gestion dans une base de données d'images référencées.

Dans un premier lieu, il fait appel à la notion d'images de références permettant au concepteur de décrire ses intentions d'une manière intuitive ; Il crée une interaction entre le système et le concepteur en lui donnant la possibilité de sélectionner des images selon leur capacité à représenter les intentions en termes d'ambiance lumineuse.

En deuxième lieu, il aide l'architecte à la génération et la réalisation d'une intention d'éclairage identifiée à partir de la sélection d'images et ensuite sur le plan quantitatif par simulation inverse sous forme de calcul des surfaces des ouvertures correspondent le niveau d'éclairement souhaité.

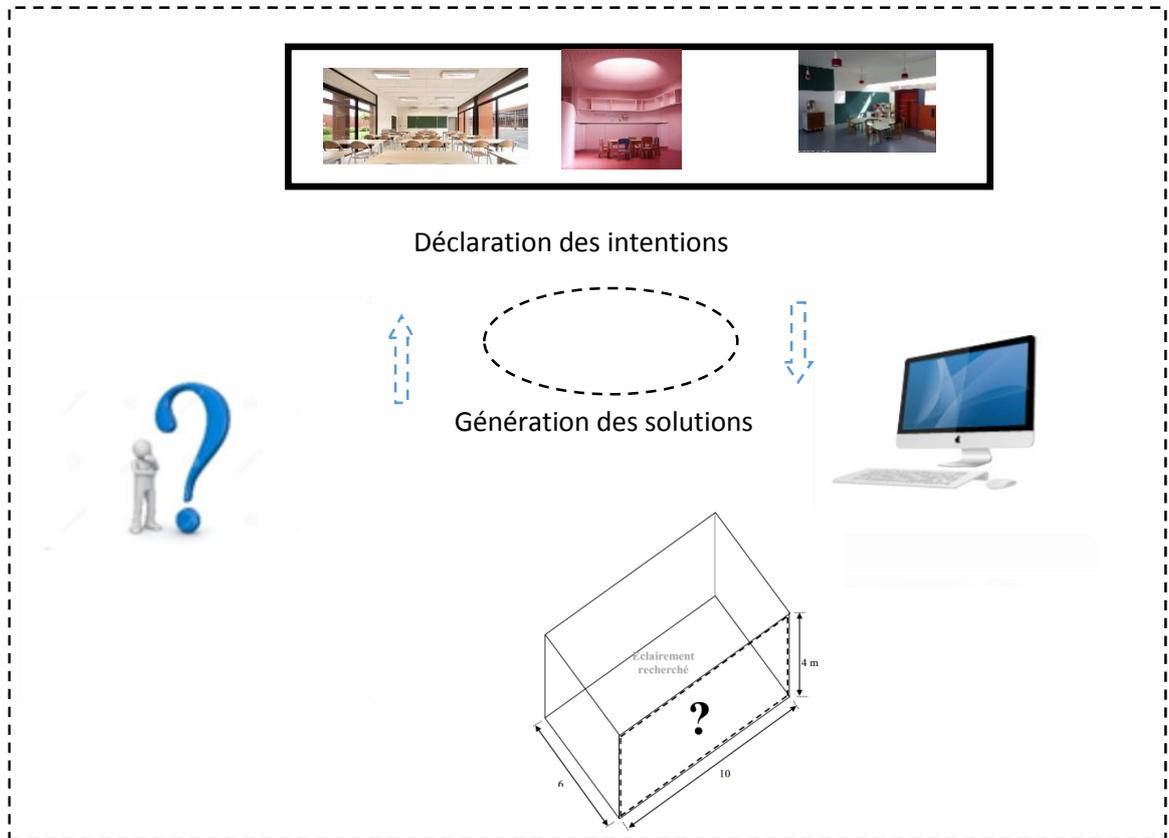


Figure VI.96 : la structure du modèle (source : auteur)

VI.1. Présentation de l'outil AD-Light version 1.0

Ce modèle de gestion de référence est destiné à assister les architectes à déclarer leurs intentions à travers des images références implémentées dans une interface web qui représente une mosaïque des images des salles de classe de HQE, Un outil d'aide à la formulation des intentions d'ambiances lumineuses en phase esquisse. Cette base de références se focalise principalement sur des établissements scolaires situés dans le monde. Ces références ne sont pas composées de cas exemple ou des précédents architecturaux dits exemplaires. Celles-ci ont été retenues pour leur capacité à générer de nouvelles significations. Il permet de déclarer les intentions par le biais d'une classe d'ambiance, d'un dispositif lumineux ou bien d'un patron ambiance afin de mieux cibler le choix du

concepteur dans un premier lieu et détermine la surface d'ouverture nécessaire pour une quantité d'éclairage intérieur donnée dans un second lieu.

VI.2. Les objectifs de l'outil AD-Light version 1.0

- Assister les architectes dans le domaine d'éclairage et ambiance lumineuse, dans les étapes initiales de leur projet.
- Aide à formuler et à déclarer les intentions lumineuse des architectes-concepteurs.
- Cet outil permet la recherche et indexation des références en utilisant l'image.
- Donner des appréciations sur l'ambiance à l'intérieur des salles de classe de HQE.
- Un système de référencement ouvert.
- Donner des propositions sous forme des classes d'ambiances, des dispositifs ou bien des patrons d'ambiance.
- Donner des connaissances sémantiques et physiques sur l'ambiance lumineuse dans les images de référence.
- Détermine la surface d'ouverture nécessaire pour une quantité d'éclairage intérieur donnée.

VI.3. Environnement de développement

Cette section présente l'environnement de développement dans lequel notre outil fut créé, et aborde également ses principaux avantages. C'est une application web, Il s'exécute dans tous les navigateurs Web. On essaiera dans notre recherche de faciliter l'indexation et la navigation dans la base de références dans le but de créer un système de référencement ouvert.

Pour implémenter notre outil il existe plusieurs environnements de développement avec différents langages. Les langages de programmation destinés au Web, sont des langages de programmation exécutés à partir d'un serveur à distance et envoyant des informations à un navigateur Web (IE, Firefox, Google Chrome, Opera, Safari,...). En théorie, la connaissance et les données de l'application devraient être situées du côté du serveur tandis que l'aspect de l'affichage et de la représentation de l'information est situé du côté client, soit celui du navigateur Web (Source internet)⁵⁰.

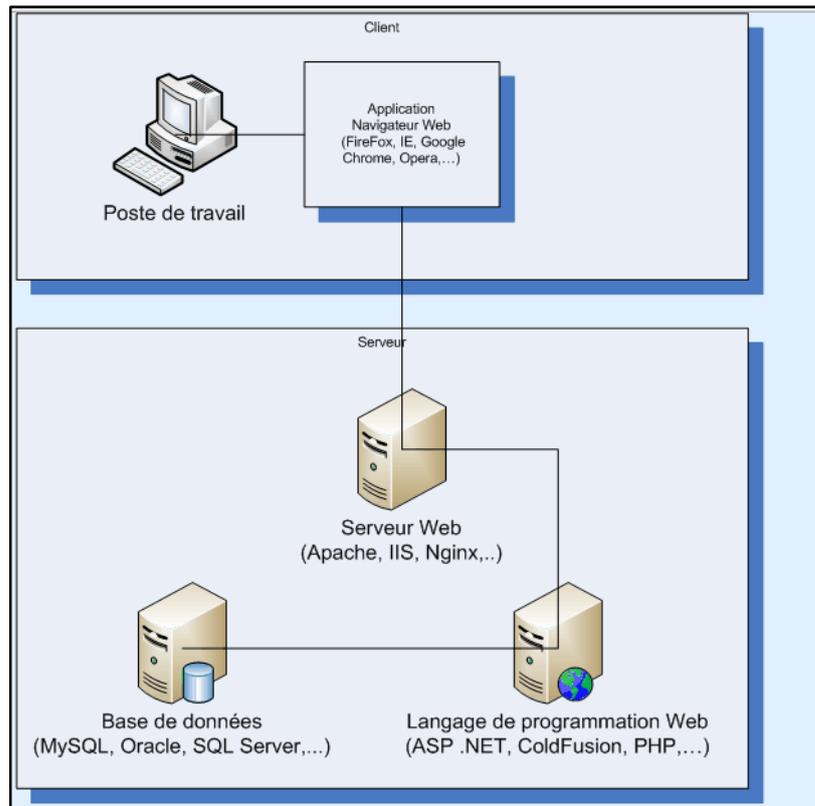


Figure VI. 97 : Schéma représentant l'environnement de développement d'un site web (source : www.gladir.com)

Le langage choisi pour notre outil est PHP ®, ses principaux atouts sont :

- La gratuité** et la disponibilité du code source (PHP est distribué sous licence GNU GPL).
- La simplicité** d'écriture de scripts .
- la possibilité d'inclure le script PHP au sein d'une page HTML.

⁵⁰ <http://www.gladir.com/LEXIQUE/ARTICLES/comparerlangagewebphpvsaspnetvsjsp.htm>

-**simplicité d'interfaçage** avec des bases de données (de nombreux SGBD sont supportés, mais le plus utilisé avec ce langage est MySQL, un SGBD gratuit disponible sur les plateformes Unix, Linux, et Windows).

-**L'intégration** au sein de nombreux serveurs WEB (Apache, Microsoft IIS, ...)(Fabrice, 2002).

Souplesse : PHP propose deux syntaxes : l'une procédurale, l'autre orienté objet. Chacune de ces syntaxes permet de mettre en œuvre les mêmes fonctionnalités mais vise des publics différents. La syntaxe procédurale est destinée aux web masters et aux informaticiens qui travaillent sur l'interface graphique des applications. La seconde syntaxe, orientée objet, est très proche de java C # dont elle s'inspire volontairement pour diminuer les coûts de formation des entreprises.

Interopérabilité : PHP peut instancier des objets COM, Net et Java. PHP dispose également de connecteurs techniques vers toutes les bases de données relationnelles du marché et également vers LDAP, XML, service Web...etc. PHP n'a pas pour vocation de remplacer ces technologies, mais de faciliter leur interfaçage afin d'offrir aux entreprise une plate – forme unique pour agréger et présenter les données issues de ces applications.

Portabilité : PHP est disponible sur l'ensemble des systèmes d'exploitation du marché. Il suffit que PHP soit déployé sur un poste client ou serveur pour que l'application fonctionne instantanément, sans recompilation, quel que soit le système d'exploitation.

Pérennité : La pérennité d'une technologie informatique dépend essentiellement de son nombre d'utilisateurs. PHP est utilisé par plus de 500 000 développeurs à travers le monde.

Limites : malgré ses nombreux atouts, PHP souffre encore de certaines limites :

-Il manque d'IDE « hauts niveaux ».

-Débuggage très limité.

-Partage des sources inexistant (utiliser un programme de versionning à part).

-Outils de développement pas à la hauteur du langage.

-Mauvaise intégration avec les progiciels mise à part SAP.

-Pas de pools de connexion.

-Pas d'accès aux bibliothèques du système (Contri, 2005).

VI.3.1. Implémentation de l'outil AD-Light version 1.0

La structure de l'outil *AD-Light version 1.0* fait appel à deux modules logiciels : une base de données d'images de références et une application de navigation dans cette base. Le premier composant est structuré et géré par un gestionnaire de base de données *MySQL*⁵¹ *WAMP*⁵² alors que le deuxième est une application développée sous un environnement en *PHP*⁵³ pour parcourir la base d'image avec une interface réalisée avec *HTML*⁵⁴, *CSS*⁵⁵, *JavaScript*⁵⁶ affichée par un navigateur web. L'idée de construire l'outil comme un ensemble de pages WEB révèle notre intention de proposer dans l'avenir une plateforme multiutilisateur (réseau⁵⁷).

Tableau 20 : Module et environnement logiciel d'implémentation de la phase de déclaration de l'outil (source : L'auteur)

Module	Base de données d'images	Application de navigation
Environnement logiciel	(WAMP [®]) MySQL [®]	Requêtes en PHP [®]
		Interface de navigation en HTML [®] , CSS [®] , JavaScript [®] + navigateur web (Mozilla [®] ...)

⁵¹ **MySQL** est un système de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR)

⁵² **WAMP** est un acronyme informatique signifiant : « Windows » « Apache » « MySQL » « PHP » dans la majorité des cas mais aussi parfois, « Perl », ou « Python ».

⁵³ **Le langage PHP** a été inventé par Rasmus LERDORF en 1995 pour son usage personnel (mise en ligne de son CV en l'occurrence). Autrefois abbréviation de Personal HomePage devenue aujourd'hui Hypertext Preprocessor, PHP s'impose comme un standard dans le monde de la programmation web par ses performances, sa fiabilité, sa souplesse et sa rapidité.

⁵⁴ **Le HTML** (HyperText Markup Language) est un langage de balisage utilisé afin de mettre en œuvre des pages Web contenant notamment des liens et des éléments graphiques. Ces pages sont conçues pour être affichées dans des navigateurs Web.

⁵⁵ **CSS** (Cascading Style Sheets) adresse les problématiques d'affichage des pages HTML. Son objectif est de permettre une séparation claire entre la structure d'une page, par le biais des langages HTML ou et sa présentation, décrite avec CSS.

⁵⁶ **Le JavaScript** est un langage de programmation de scripts orienté objet. JavaScript a été créé en 1995 par Brendan Eich, un ingénieur de Netscape. JavaScript propose différents mécanismes permettant de faire interagir les éléments écrits avec les langages HTML, et CSS d'une page Web avec les scripts JavaScript.

⁵⁷ Un réseau est un groupe d'entités en communication. (<https://openclassrooms.com>)

VI.3.2. Structure de la base de données :

La base de données de « *AD-Light version 1.0* » Avec MySQL Workbench9 cette dernière est structurée en 5 tables. Le premier « user » contient le nom d'utilisateur et le mot de passe pour l'accès à l'application. 2eme table « image » attribuant un identifiant unique à chaque image, un nom, des informations sur le projet représenté et le lien de localisation du fichier et de stockage. Cette table a une relation avec table« projet », table« pays » afin d'optimiser la base de donnée et éviter la redondance,

Ces images sont indexées par des mots clés issus d'un thésaurus à quatre facettes : dispositif lumineux, quantité de lumière, classe d'ambiance, surfaces intérieures. Ce dernier permet de donner une description du projet architectural représentée dans l'image (nom du projet, adresse, pays, nom du concepteur), et finalement une description sémantique de l'objet architectural représenté (à travers les mots clés)

Les fonctions de navigation et de sélection intégrée aux deuxièmes composant permettent de parcourir cette base de manière interactive afin d'identifier les mots clés de la facette « classe d'ambiance » ayant le plus de poids correspondant ainsi aux intentions du concepteur.



Figure VI.98 : la base de données de « AD-Light version 1.0 » Avec MySQL Workbench58 (source : auteur)

⁵⁸ Infos en ligne <http://www.mysql.fr/products/workbench/> Téléchargement

L'installation de MySQL Workbench nécessite l'installation préalable des éléments suivants : – Microsoft Visual C++ 2010 x86 Redistributable Setup (vc_redist_x86.exe) – Microsoft .NET Framework 4 Setup (dotNetFx40_Full_x86_x64.exe)

VI.4. Modélisation de l'interface

Dans le but de tester cette proposition et la confronter avec la réalité, on propose une maquette virtuelle, montrant les différentes étapes du processus, son mode de fonctionnement, ceci en utilisant image photographique dans la déclaration des intentions. Cette maquette est mise en forme de la structure de notre outil, déjà précisée, mais uniquement sur la première partie portant sur la déclaration des intentions et la génération de résultats.

La page d'accueil

L'utilisateur entre dans le système « AD-Light version 1.0 », il fournit son pseudo et son mot de passe :

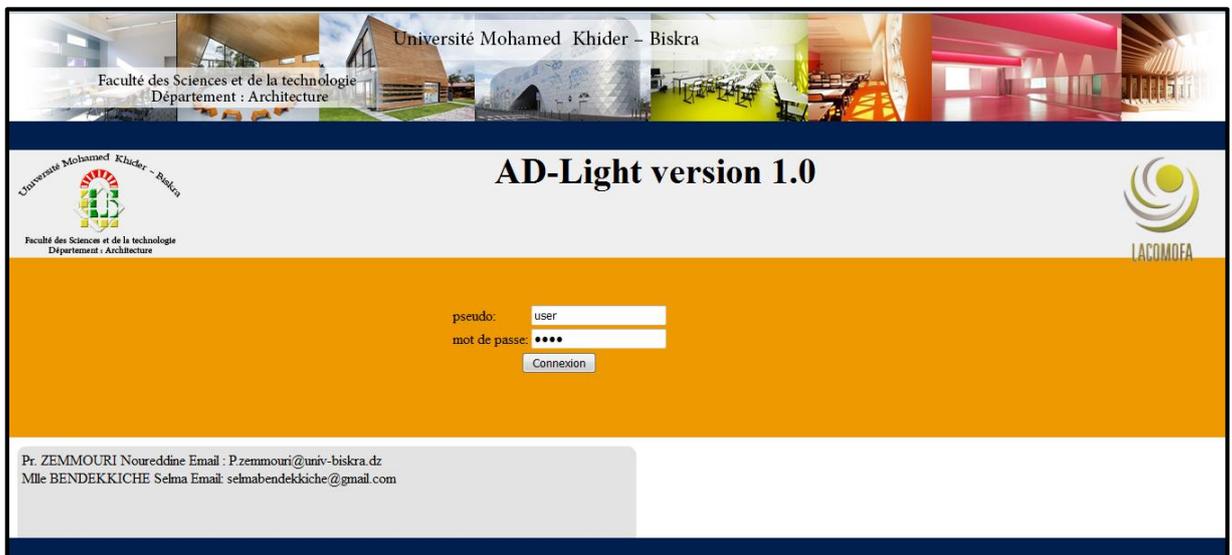


Figure VI.99: la page d'accueil « AD-Light version 1.0 » (source : auteur)

VI.4.1. La phase de déclaration : AD-Light version 1.0

Cette phase se structure en 2 options :

Indexation – cette option se réfère à la création de références. Elle est générique et peut être utilisé pour indexer n'importe quel corpus d'images à partir du moment où le thésaurus est fourni.

Les images photographiques constituant la base de données sont indexées par des mots clés décrivant de manière sémantique les propriétés des configurations architecturales

représentées. Chacun des mots clés est caractérisé par un poids qui varie entre 0 et 1. La valeur de ce poids augmente si une image indexée par ce dernier est sélectionnée, diminue si l'image indexée par le mot clé est refusée et reste la même si l'image demeure neutre (Halin, 1989).

La zone d'indexation permet :

- Gestion d'une référence
- Création d'une référence
- Ajouter / supprimer des images références
- Créer une description Modification d'une référence existante
- Sélectionner référence
- Suppression d'une référence

Interface s'organise en plusieurs zones :

Zone A : se trouve le thésaurus, présente les descripteurs associés à l'image à partir du thésaurus et particulièrement à partir du dernier niveau hiérarchique. Les modifications du thésaurus a posteriori de l'indexation des images sont aussi possibles.

Zone B : nous pouvons voir la zone d'indexation des images (le contexte et les descripteurs pondérés), présente la pondération manuelle des termes qui est représentée sous forme d'étoiles allant de 1 étoile (pas influent) à 5 étoiles (très influent).

Zone C : nous avons les informations sur l'image (source, date, etc.), L'indexeur doit ajouter le nom de l'image, l'année de capture et la source. La zone de commentaire présente les informations contextuelles relatives au projet et qui doivent être complétées par l'indexeur.

Zone D : l'aperçu de la liste d'images contenues dans la base. Cette zone propose une mosaïque d'images permettant au concepteur de sélectionner des images, de les refuser ou de garder une neutralité selon leur niveau de correspondance à ses intentions.

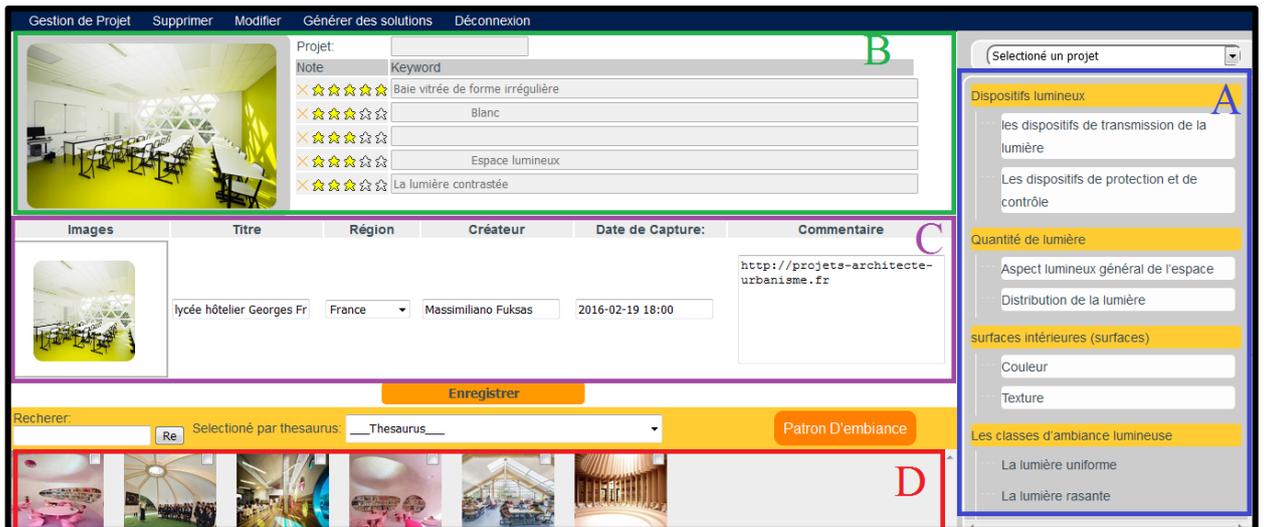


Figure VI.100 : capture d'écran représentant l'option d'indexation « AD-Light version 1.0 » (source : auteur)

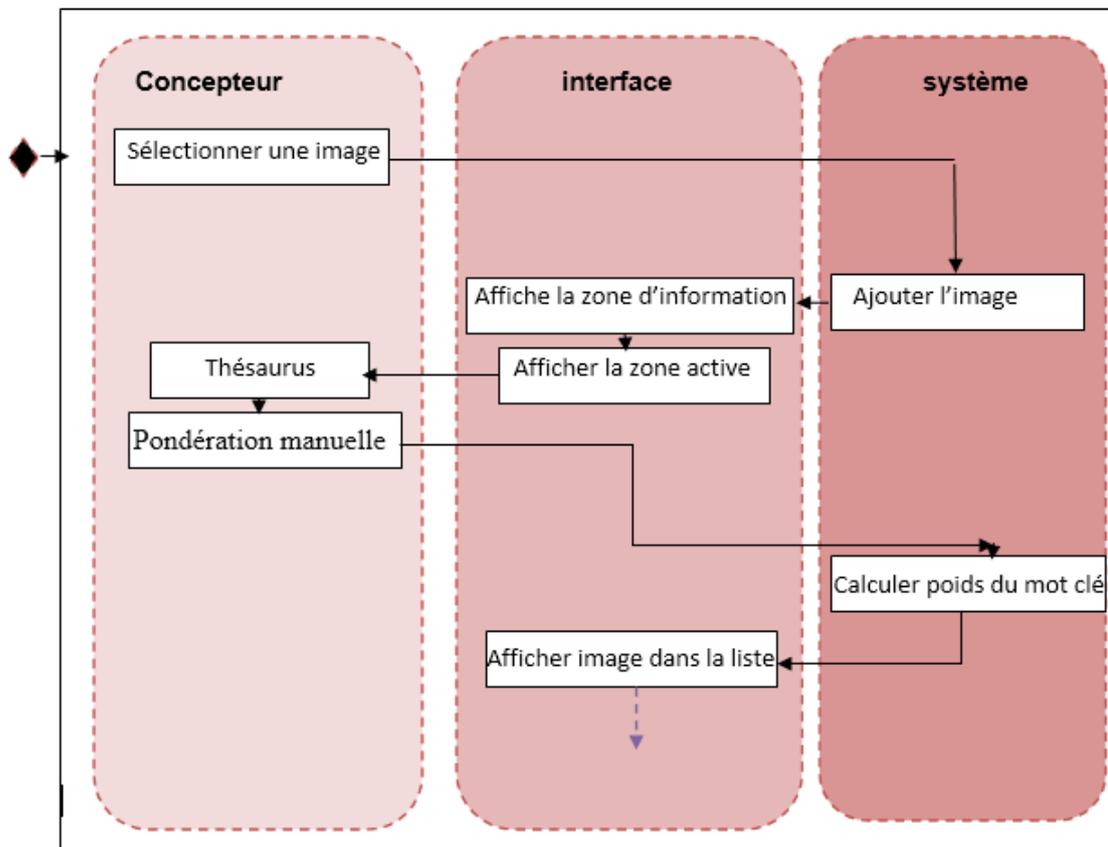


Figure VI.101 : Processus et activités de l'indexation (déclaration des intentions)

La navigation— cette option facilite la recherche par mot clé (catégories des classes d'ambiance), par patron d'ambiance (classe d'ambiance, dispositifs). La base d'images

références qui a servi au développement du prototype est composée de 50 images indexées selon la méthode présentée au chapitre V.

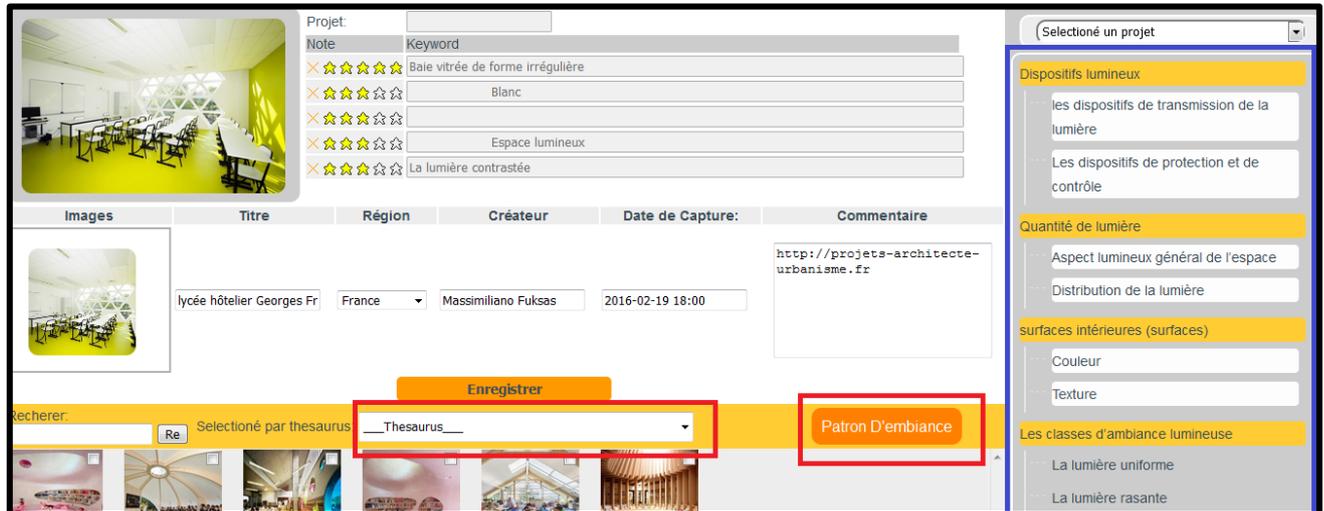


Figure VI.102 : Capture d'écran représentant l'option de navigation « AD-Light version 1.0 » (source : auteur)

L'utilisateur a cliqué sur le bouton patron d'ambiance il accède à l'interface de navigation. Cette zone intègre un repère de navigation à trois sommets. Les sommets correspondent aux trois facettes qui caractérisent le patron d'ambiance. Chaque sommet renvoie à un ensemble d'icône, Le placement du curseur sur un sommet, au milieu du triangle permet de focaliser la recherche d'images sous forme de mosaïque. Ainsi pour une même sélection d'icône, Une étiquette s'affiche donnant une définition et des recommandations. L'utilisateur peut ainsi choisir et cibler entre la classe d'ambiance, dispositifs ou bien le patron d'ambiance.

Le concepteur répète cette opération pour déclarer ses intentions en évaluant à chaque fois les images proposées jusqu'à atteindre à un niveau de satisfaction. Cette sensation de satisfaction signifie qu'il a pu, à travers la sélection d'images, formaliser et projeter ses intentions.

Cette étape constitue la fin du processus de déclaration des intentions permettant la génération de solutions.

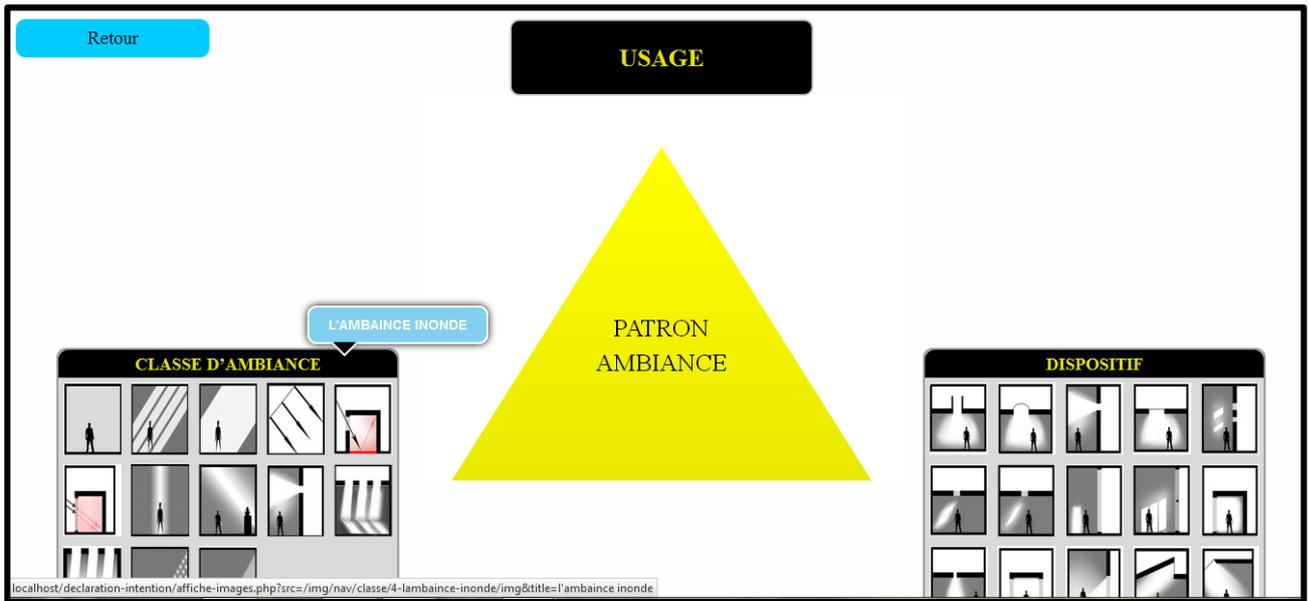


Figure VI.103 : capture d'écran représentant la recherche par patron d'ambiance « AD-Light version 1.0 » (source : auteur)

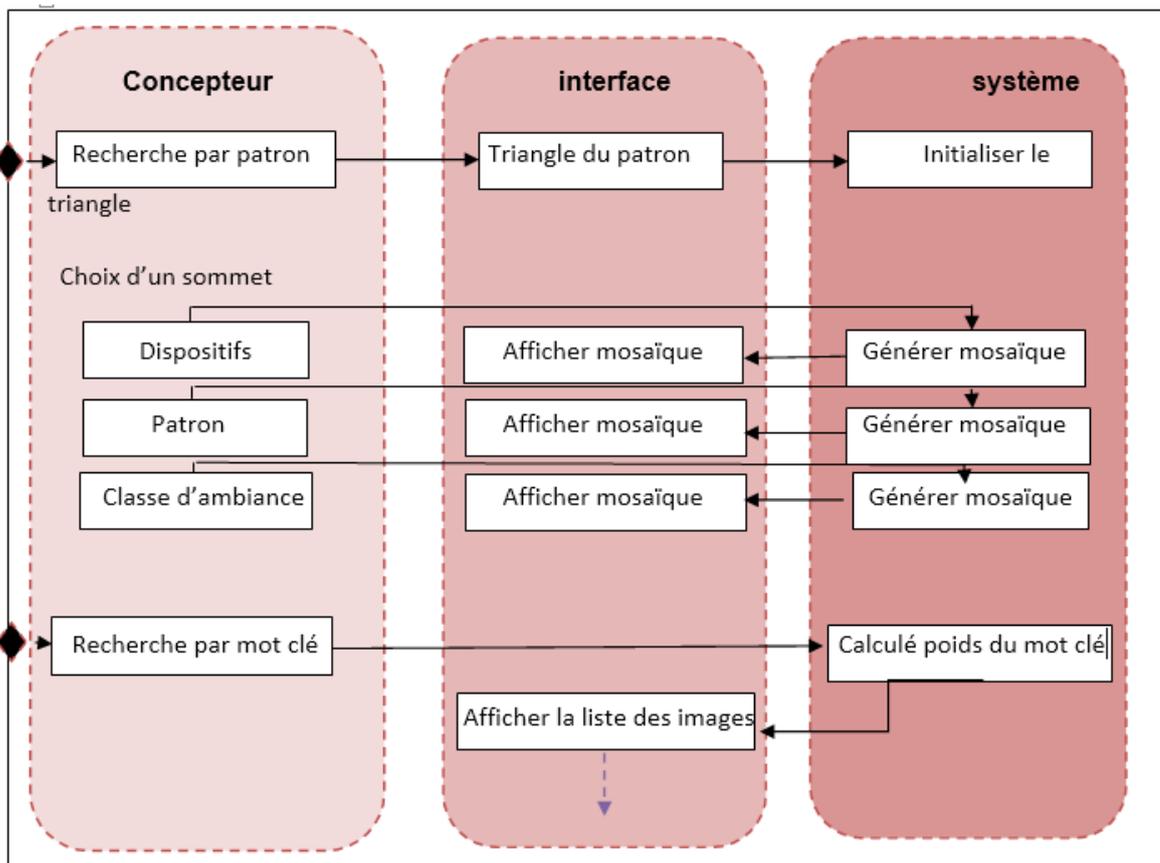


Figure VI.104 : Processus et activités de recherche par patron (déclaration de l'intention) (source : l'auteur)

VI.4.2. La phase de génération des solutions : AD-Light version 1.0

Nous abordons dans cette partie la méthode d'implémentation des activités qui caractérisent la phase de génération et d'évaluation des solutions en partant de la déclaration des intentions du concepteur.

Comme pour la déclaration d'intentions, trois acteurs participent au processus de génération de solutions : le concepteur, une interface d'échange et le système. Ce processus commence par une activité, réalisé par le système, d'identification des intentions du concepteur en analysant les résultats issus de la navigation dans la base d'images en identifiant les classes d'ambiances. Comme exemple le type d'effet uniforme en prenant éclairage comme intentions d'ambiance. Le concepteur peut ensuite paramétrer l'activité de génération de solution et de dimensionner les ouvertures.

Cette phase se structure en plusieurs étapes de calcul :

Etape 1 : pour cette étape l'utilisateur doit introduire :

- les coordonnées géographiques (Latitude, Longitude, Altitude)
- les Coordonnées photométriques (La valeur de l'éclairage extérieur global reçu sur une surface horizontale correspondant au lieu et à la date du calcul)
- L'orientation du volume

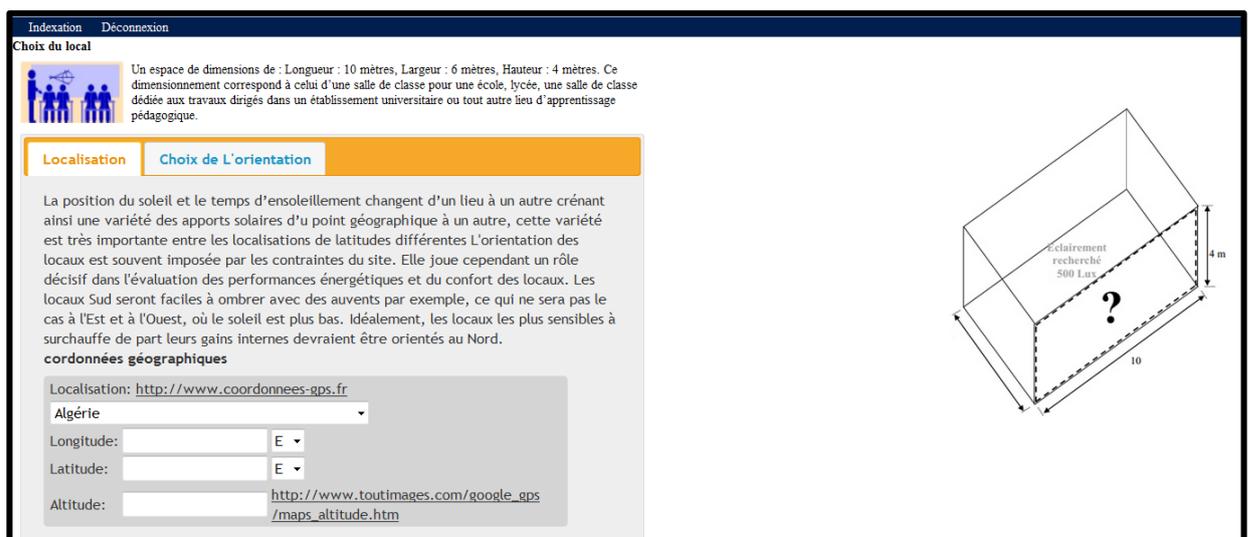


Figure VI.105 : capture d'écran représentant l'insertion de données « AD-Light version 1.0 » (source : l'auteur)

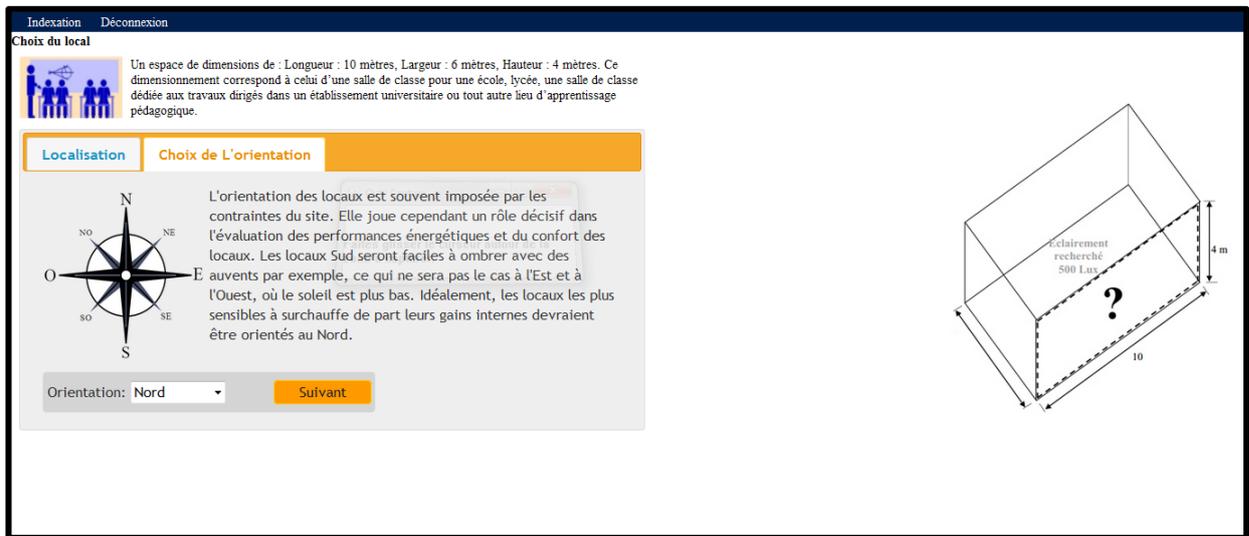


Figure VI.106 : capture d'écran représentant l'insertion de données « AD-Light version 1.0 » (source : l'auteur)

Étape 2 : cette étape se caractérise par insertion les différents d'angles de l'azimut et de la hauteur du soleil correspondant à la date et à l'heure du calcul par l'utilisateur :

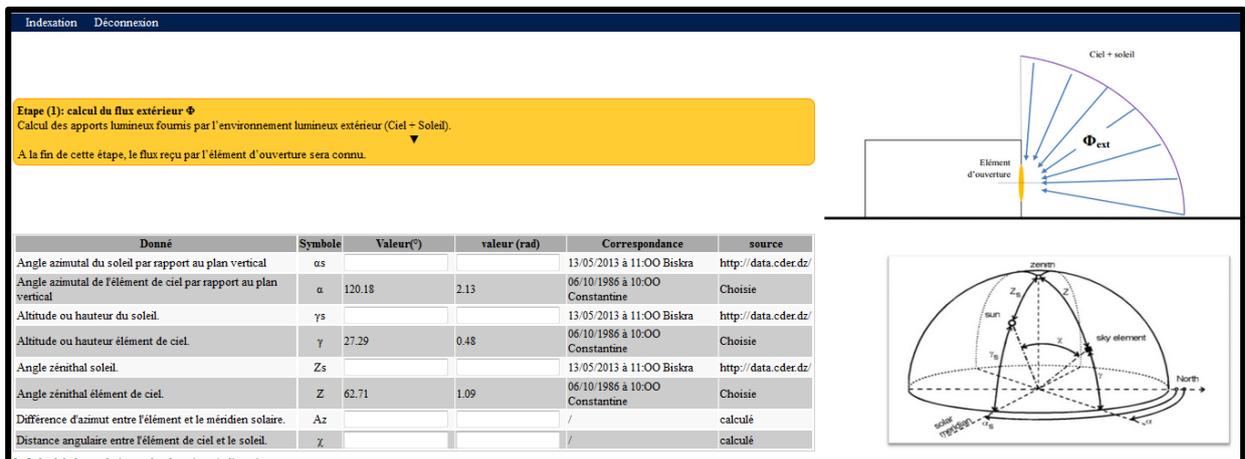


Figure VI.107 : capture d'écran représentant l'insertion des donnée « AD-Light version 1.0 » (source : l'auteur)

Étape 3 :

A cette étape le concepteur a fait le choix de l'emplacement du point de calcul (son hauteur par rapport au sol et sa distance par rapport au mur. Après le lancement du calcul, les résultats

s'affichent sur la même interface. Cela permet au concepteur de visualiser ces résultats de manière instantanée.

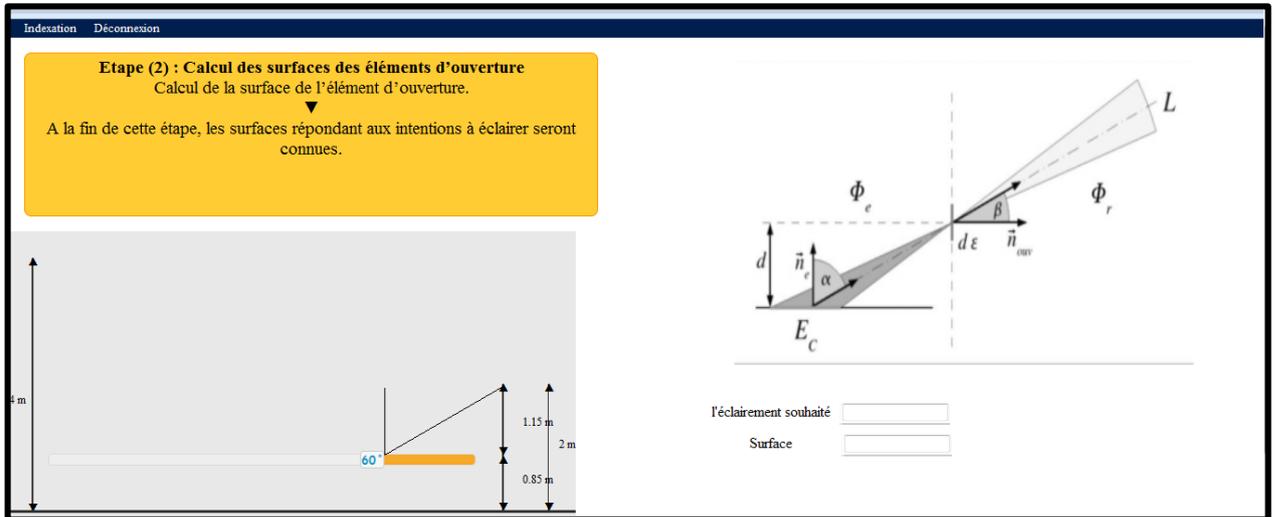


Figure VI.108 : capture d'écran représentant le choix de l'emplacement du point de calcul et le résultat du calcul de la surface « AD-Light version 1.0 » (source : auteur)

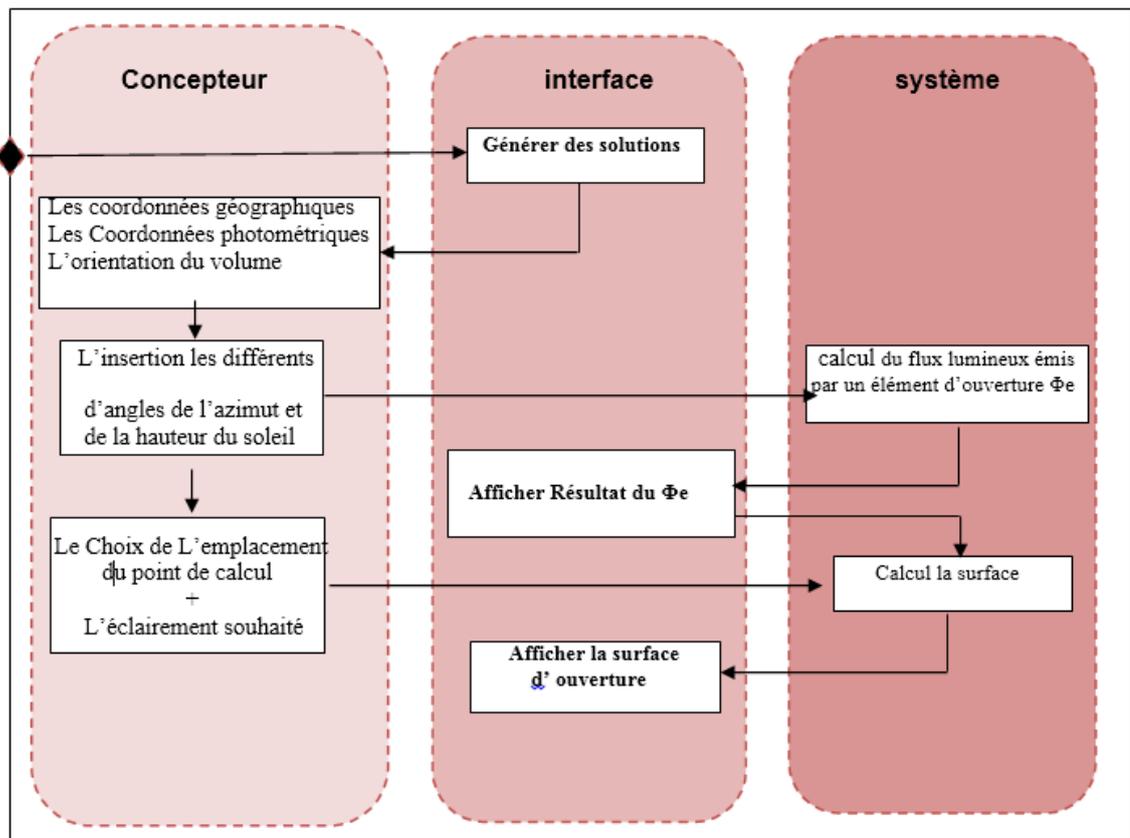
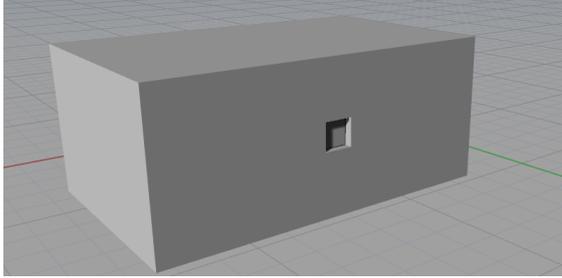
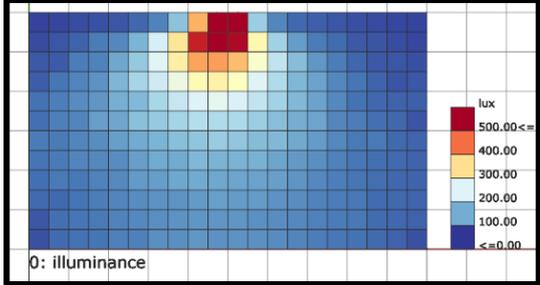
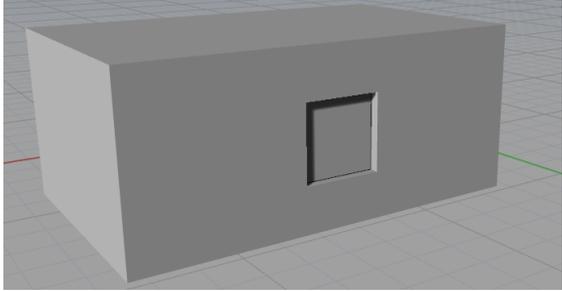
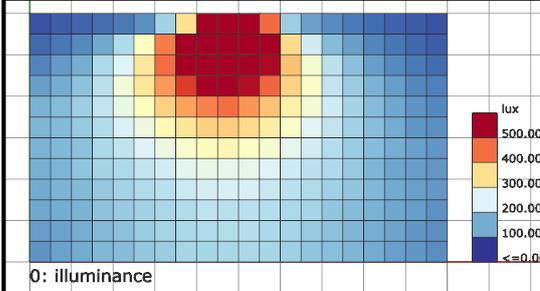
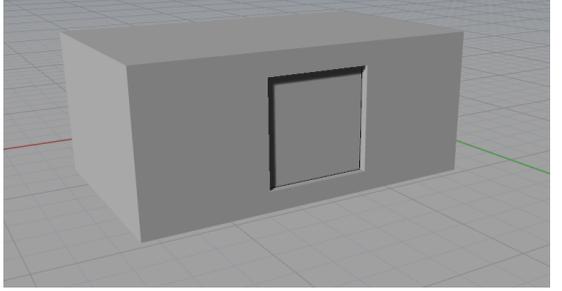
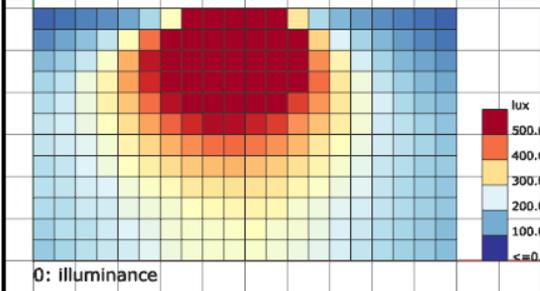


Figure VI.109 : Processus et activités de la phase de génération des solutions (source : l'auteur)

Tableau VI.22 : les résultats de simulation (source : auteur)

Modèle 3D (Rhinosource ®)	plug-in Honeybee & Ladybug pour Rhinosource ®
	
<p>Résultats du calcul au point (P1) la valeur d'éclairement obtenu par plug-in Honeybee & Ladybug pour Rhinosource ® correspond à la valeur souhaitée</p>	
	
<p>Résultats du calcul au point (P2) la valeur d'éclairement obtenu par plug-in Honeybee & Ladybug pour Rhinosource ® correspond à la valeur souhaitée</p>	
	
<p>Résultats du calcul au point (P3) la valeur d'éclairement obtenu par plug-in Honeybee & Ladybug pour Rhinosource ® correspond à la valeur souhaitée</p>	

VI. CONCLUSION

Tout au long de ce chapitre, nous avons présenté la démarche adoptée pour l'implémentation de notre modèle « AD-Light version 1.0 ». Le mode de fonctionnement et la modélisation de différentes interfaces proposées.

À première vue l'outil que nous proposons peut donner l'impression d'être une addition de micro-outils, mais nous insistons sur le fait que les différents modes de navigation proposés ont pour objectifs d'être complémentaires. Cet outil nous l'avons voulu à la fois flexible, malléable, intuitif et facile d'apprentissage, autant de qualités qu'un outil d'assistance à la conception.

L'un des enjeux de notre proposition est d'utiliser les images références à la fois comme source d'information et comme moyen pour la recherche et l'interprétation. Il assure un bon déroulement de l'activité de référencement. Il permet aux architectes d'intégrer leurs propres images références.

Le concepteur peut déclarer ses intentions par le biais d'un mot clé du thésaurus et exclusivement à partir du dernier niveau hiérarchique ou passer par patron qui permet de mieux cibler son choix.

Voir la difficulté de prendre toute les paramètres générant une ambiance souhaité. Nous avons reformulé et simplifié l'intention du concepteur afin de satisfaire les contraintes de lumière et les intégrer au processus de design. Nous avons pris parmi les paramètres statiques du confort visuel l'éclairage afin de générer des réponses sous forme des surfaces des ouvertures vérifiant les intentions souhaité au départ (classe d'ambiance). Les résultats de la simulation par plug-in Honeybee & Ladybug pour Rhinoceros[®] a été montré que la valeur d'éclairage obtenu correspond à la valeur souhaitée.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de recherche s'inscrit dans le paradigme de l'approche inverse, il traite la problématique de la prise en compte et l'intégration des ambiances lumineuse précisément celle produite par la lumière naturelle durant les phases initiales du processus de conception architecturale. Notre travail visait à contribuer à la réflexion sur le développement d'un modèle d'aide à la conception des ambiances lumineuses par intention. Qui offre la possibilité de générer des réponses architecturales en partant d'une description qualitative et quantitative des intentions d'éclairage naturel. Ces solutions constituent des propositions de matérialisation des intentions sous la forme des ouvertures générant un type d'ambiance particulier.

Aborder la qualité lumineuse dans la salle de classe demeure parmi l'un des plus déterminants. Son architecture est un élément de la pédagogie, cet espace est pour l'élève un référent qui le marque pour toute sa vie, il s'identifie souvent à cet espace qui lui est familier. Il joue un rôle essentiel dans le développement de leurs capacités intellectuelles en favorisant l'épanouissement de leurs personnalités et leur apprentissage de la vie. Les établissements existants et les approches connues pour en créer de nouveaux ne répondent plus aux exigences présentes, la nouvelle demande appelle de nouvelles solutions en termes d'éclairage naturel et ambiance lumineuse. Les établissements doivent répondre aux besoins répertoriés et identifiables d'aujourd'hui, mais également aux demande incertaines du futur. La façon dont la lumière naturelle est fournie est donc déterminante de la qualité des milieux scolaires. C'est en ce sens que l'intégration des concepts du confort visuel dans le processus de conception architecturale et de réalisation de ces établissements devient de plus en plus inévitable. Il nous semble primordial d'être l'occasion d'une recherche particulière en termes d'ambiance lumineuse.

Le choix des qualités lumineuses reste essentiellement une tâche assez délicate qui nécessite, dans toutes les phases du projet, un investissement considérable, des connaissances vastes et des idées nouvelles qui permettent à l'architecte de mieux réaliser son projet. De plus, la lumière naturelle peut se dévoiler comme un moyen architectural particulièrement riche dans la génération des ambiances (Chaabouni, 2011).

Ce travail de recherche a permis de mettre en place un modèle « *AD-Light version 1.0* » implémentées dans une interface web. L'idée de construire l'outil comme un ensemble de pages web révèle notre intention de proposer dans l'avenir une plateforme multiutilisateur ; un réseau. Notre modèle s'appuie sur une exploitation d'une base de références assurant une inspiration soutenue pour favoriser la génération et la formalisation des idées sur l'ambiance lumineuse et de réalimenter la réflexion initiale.

Ce travail est le résultat d'un croisement d'un ensemble de travaux de recherche de : Chaabouni (2011), Cervantès (2012), Gallas (2013), Daiche (2015). La mise en place de ce modèle a commencé par utilisation des images des salles de classe de HQE comme support de déclarer les intentions du concepteur. Malgré certaines limites des images photographiques dans l'étude des ambiances lumineuses, l'analyse des différentes sortes d'images a mis en évidence la puissance des images photographiques dans l'évocation des ambiances lumineuses d'un espace construit et de construire des connaissances utiles à la formalisation des intentions de projet.

Il assure un bon déroulement de l'activité de référencement. Il permet aux architectes d'intégrer leurs propres images références.

Les modes de navigation utilisées dans « *AD-Light version 1.0* » sont complémentaires. Le concepteur peut déclarer ses intentions par le biais d'un mot clé du thésaurus et exclusivement à partir du dernier niveau hiérarchique ou passer par patron qui permet de mieux cibler son choix.

Voir la difficulté de prendre toute les paramètres générant une ambiance souhaité. Nous avons reformulé et simplifié l'intention du concepteur afin de satisfaire les contraintes de lumière et les intégrer au processus de design. Nous avons pris parmi les paramètres statiques du confort visuel l'éclairage afin de générer des réponses sous forme des surfaces des ouvertures vérifiant les intentions souhaité au départ (classe d'ambiance). Pour atteindre cet objectif nous avons intégré le modèle numérique MNSIEN développé et validé par Daiche, M (2015). Ce modèle nous permet la réalisation d'une intention d'éclairage intérieur dans le plan quantitatif par simulation inverse de l'ensoleillement.

Pour valider cette proposition, sous son aspect opérationnel, il est nécessaire de le soumettre à l'expérimentation et développer un outil opérationnel et le proposer à des étudiants en architecture afin de vérifier sa capacité à aider ces derniers à exprimer leurs idées et produire un espace avec d'autre classe d'ambiance lumineuse.

Cette stratégie fournit un outil hybride ayant pour but d'associer des impressions lumineuses à la fois quantitatives liées au calcul d'aider un architecte à dimensionner les ouvertures de son projet et qualitatives, liées à la déclaration des intentions à travers des classes d'ambiance, des dispositifs ou bien des patrons d'ambiance. Cette particularité hybride de l'outil développé supporte donc le concepteur pour associer un aspect sensible lié à l'ambiance lumineuse souhaitée dans son processus de design.

Conformément à ce que nous avons formulé dans l'introduction de ce travail, L'insertion de la simulation inverse dans le processus de conception permet à répondre au problème de la création d'un outil d'aide à la conception par l'intention d'ambiance lumineuse et Le recours aux références photographiques dans la conception des ambiances peut guider l'architecte dans la formulation de ses intentions.

Il faut se rappeler que la conception assistée par ordinateur ne génère aucunement la réponse architecturale à une recherche créative, mais en stimule le processus à l'étape préliminaire de design. On ne doit pas considérer l'ordinateur comme une extension de l'esprit, mais plutôt comme un partenaire dans le processus de conception avec des aptitudes et des raisonnements fondamentalement différents (Caglar, 2014).

PERSPECTIVES

Enfin, la réponse portée à la problématique de cette recherche nous a ouvert de nouveaux horizons de recherche qui visent particulièrement à enrichir les fonctionnalités offertes par notre modèle. Ceux-ci vont nous permettre d'approfondir d'autres aspects en vue de les améliorer à court terme, et de découvrir d'autres possibilités d'explorer à long terme

Dans ce travail de recherche, l'enrichissement au niveau de la déclaration d'intention est celle de renforcer la banque de données d'images avec d'autre projet de référence et d'autres types d'images pour compléter la base (images de simulation, photographies de vues extérieures (avoir des informations sur le bâtiment représenté, visualiser toutes les images représentant un même bâtiment...)). Il serait donc important de réfléchir de maintenir une base de références partagée entre plusieurs architectes et ajouter avec d'autres modes de navigation différents. Il sera intéressant, de compléter et enrichir les différents patrons d'ambiances, ils pourraient être développés et caractérisés afin être intégrées à un moteur génératif pour proposer des solutions architecturales ; Cela permettra de perfectionner notre modèle.

Au niveau de génération des solutions, le modèle a pris un seul facteur celui de l'éclairage comme générateur des classe d'ambiance. En ce sens, il serait important de prendre d'autre critères statiques, tels que le FLJ et l'uniformité où le concepteur peut identifier les zones désignées à recevoir la lumière naturelle directe Afin de générer d'autre d'ambiances lumineuses.

Dans de prochains travaux, nous proposons à long terme d'intégrer des indicateurs dynamiques tel que Eclairage utile (Useful Daylight Illuminances – UDI) et Ratio d'éclairage vertical / horizontal (Ratio VH).

D'autres perspectives plus larges portent sur la possibilité d'intégrer les contraintes d'éco-conception en qui associe les contraintes de lumière naturelle avec des contraintes thermiques et environnementales. Et introduire les techniques d'optimisation comme les algorithmes génétique qui peut venir ouvrir le champ de la recherche proposée.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdelatia, B. (2013).** *Contribution à l'étude du confort visuel en lumière naturelle dans les établissements scolaires en Libye : évaluation qualitative et préconisations.* Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Bordeaux.
- Andriamarozakaniaina, T-Z-F. (2012).** *Du texte à la génération d'environnements virtuels 3D : Application à la scénographie théâtrale.* Thèse de doctorat, Université Toulouse 2 Le Mirail (UT2 Le Mirail)
- Augoyard, J-F. (2008).** *Faire une ambiance,* Ecoles Nationales Supérieures d'Architecture de Grenoble et de Nantes.
- ARENE & ICEB. (2014).** *Guide Bio-tech : l'éclairage naturel,* CSTB Editions, 2014.
- Arsenault, H. (2012).** *Effets du verre teinté sur la qualité de la lumière naturelle, l'éveil des Occupants et l'utilisation d'un Éclairage d'appoint.* Mémoire de master. Faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels, Université de Laval. Québec.
- Baker, N. Franchiotti, A. Steemers, K., (1993).** *Daylight in architecture- A European Reference Book.* Ed. James & James, London.
- Belakehal, A. (2007).** *Etude des aspects qualitatifs de l'éclairage naturel dans les espaces architecturaux. Cas des milieux arides à climat chaud et sec.* Thèse de doctorat. Université Khider Mohamed, Biskra.
- Ben cheikh, A. (2007).** *Impact de la conception des salles de classe sur l'ensoleillement, le confort visuel et le comportement des écoliers : Cas des écoles primaires du Sud-est algérien.* Mémoire de magister. Université Khider Mohamed, Biskra.
- Benharkat, S. (2006).** *Impact de l'éclairage naturel zénithal sur le confort visuel dans les salles de classe.* Mémoire de magister. Université de Constantine.
- Biron, K. (2008).** *Dynamique forme/lumière : Exploration du processus de création de l'espace architectural par modèles maquettes/images.* Maîtrise en sciences de l'architecture, Université Laval.
- Bonnefoi, P. (1999).** *Techniques de satisfaction de contraintes pour la modélisation déclarative : Application à la génération concurrente de scènes.* Thèse de doctorat. Université de Limoges.
- Bonte, M. (2014).** *Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment Modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ.* Thèse de l'Université Toulouse 3.
- Boubekri, M. (2008).** *Daylighting, Architecture and Health - Building Design Strategies (1 ed.).* Oxford : Elsevier.

- Bouffard, É. (2013).** *Conception de bâtiments solaires : méthodes et outils des architectes dans les phases initiales de conception.* Maîtrise en sciences de l'architecture. Université de Laval.
- Broadbent, G. (1969).** *methodology in the service of delight, Head of School of Architecture,* Portsmouth Polytechnic, King Henry 1 Street, Portsmouth.
- Beguin, D. (2006).** *Guide de l' Ecoconstruction,* l'équipe de l'AREL, l'équipe de l'ADEME, le service de communication de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse.
- Caglar, A-H. (2014).** *Structures adaptatives en fonction de la lumière : DARMIN comme outil de génération d'ambiances architecturales dynamiques.* Maîtrise en sciences de l'architecture. Université de LAVAL.
- Cantin, F. (2008).** *Évaluation de la qualité lumineuse d'un environnement de travail éclair naturellement.* Mémoire de master. Faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels ; Université de Laval, Québec.
- Cervantès, I. (2012).** *Identification et caractérisation des ambiances lumineuses en milieu architectural : Comment passer de l'idée d'ambiance lumineuse à une solution architecturale ?* Mémoire de Master recherche. Nancy. Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (UMR MAP/CRAI)- Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
- Chaabouni, S; Bignon, J-C & Gilles, H. (2007).** *Conception des ambiances lumineuses : Navigation et raisonnement par l'image pour la formulation des intentions,* Ecole d'Architecture de Nancy.
- Chaabouni, S. (2011).** *Voir, savoir, concevoir. Une méthode d'assistance à la conception d'ambiances lumineuses par l'utilisation d'images références.* Thèse de doctorat. INPL Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy.
- Chain, C. (2004).** *La caractérisation spectrale et directionnelle de la lumière naturelle.* Thèse de doctorat. Institut National des sciences Appliquées de Lyon.
- Clement, M& Marchetto, L. (2006).** *Guide de l'écoconstruction,* ADEM ET AREL Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine.
- Colin, E. Desmontil, J-Y. Martin, J-P-M. (1997).** *Modèle Utilisateur d'un Modeleur Déclaratif,* Université de Nantes.
- Contri, P. (2005).** *Etude comparative entre PHP, J2EE et Dot Net.* ARIANE.
- Cornier, M. (2006).** *Valoriser la lumière naturelle – architecte D.P.L.G. –mémoire fin de stage.* Ecole d'Architecture de Lyon.
- Coulombe, M ; Demers, C ; Potvin, A. (2010).** *Dynamique des ambiances lumineuses par relevés vidéo d'espaces de transition.* Université Laval, Canada.
- Coutelier, B. (2006).** *Caractérisation de la qualité d'un environnement lumineux à l'aide d'outils de mesure vidéo-photométriques et de simulations en milieux virtuels.* Thèse de doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

- Daiche, A-M. (2015).** *Vers un outil d'aide à l'optimisation de l'éclairage naturel dans le processus de conception architecturale : Approche inverse.* Mémoire de magistère. Université de Batna.
- Delétré, J-J. (2003).** *Données de base pour l'éclairage des bureaux.* Laboratoire CRESSON Centre de recherche sur l'espace sonore et l'environnement urbain, École d'Architecture de Grenoble.
- Dumas, R.** *Projet d'Application : Exploration des méthodes d'optimisation pour aider la conception des bâtiments -Application à l'éclairage naturel-*
- Demers, C. et Hawkes, D. (1996).** *Images of light: an approach to space generation from lights,* dans les Actes de la 4th European Conference on Solar Energy in Architecture and Urban Planning, Berlin, Allemagne, 26-29 mars 1996.
- Demers, C. (1997).** *Étude préparatoire au plan lumière de la capitale nationale du Québec.*
- Demers. (1997).** *The Sanctuary of Art: images in the assessment and design of light in architecture.* Thèse PhD, University of Cambridge, Emmanuel College, UK.
- Demers, C. (1998).** *Qualities of light and space: contrast as a global integrator,* First Symposium of the Quality of Light, Ottawa, Canada, 9-10 May, p.1 -8.
- Demers, C. (2000).** *Light and the Digital Image: A proposed framework for design and analysis.* In : PLEA (Passive Low Energy in Architecture). Architecture City Environment, Cambridge, UK, July 2000. Ed. Koen Steemers and Simos Yannas.
- Demers, Claude & Potvin, A. (2004).** *LUMcalcul2.01 : prédiction de la lumière naturelle pour la conception architecturale.* In: Proceedings of eSIM2004, Vancouver. 2004. p. 9–11.
- Demers, C. (2006),** *Assessing light in architecture: a numerical procedure for a qualitative and quantitative analysis,* Proceedings of International Lighting Conference, AIDI, CIE, Venise, October 2006.
- Demers, C. (2007).** *A classification of daylighting qualities based on contrast and brightness analysis,* Proceedings of ASES, SOLAR 2007, July 2007.
- Demers, C., Dubois, C. & Potvin, A. (2007),** *The influence of daylighting on occupants ; comfort and diversity of luminous ambiances in architecture,* Proceedings of ASES, SOLAR 2007, July 2007.
- Diepens, J & Bakker, F & Zonneveldt, L. (2000).** *Daylight Design Variations Book by the TNO-TUE Centre for Building Research.* In : [en ligne]. 2000. (Consulté le 11 janvier 2014). Disponible à l'adresse : <http://sts.bwk.tue.nl/daylight/varbook/index.htm>.
- Derek, Philips. (2004).** *Daylighting : natural light in architecture.* Edition Architectural Press.
- Dirahoui, M-A. (2015).** *Caractérisation de la qualité de l'environnement lumineux à l'intérieur des ateliers d'architecture.* Mémoire de magister. EPAU.

- Dubois, C. (2006).** *Confort et diversité des ambiances Lumineuses en architecture, l'influence de l'éclairage naturel sur les occupants.* Mémoire de master. Faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels. Université de Laval, Québec.
- Doyle, Shelby & Reinhart, C. (2010).** *High Dynamic Range Imaging & Glare Analysis III. GLARE ANALYSIS WITH EVALGLARE.* Harvard Graduate School of Design.
- Erwine, B., Heschong, L. (2002).** *Lighting for learning, focus on ongoing studies linking daylighting and student performance.* Light fair international seminarreview.
- Estia SA, (2003).** *DIAL-Europe 3.0 : Guide de l'Utilisateur.*
- Fabrice, R. (2002).** *LES LANGAGES DYNAMIQUES SUR INTERNET.* Mémoire ingénierie informatique et réseaux. École supérieure de génie informatique. Paris.
- Fixmer, P, Chaabouni, S, Gregori, N et Brassac, C. (2010).** *Conception collaborative d'une esquisse à l'aide d'un dispositif numérique de design architectural.* In : Séminaire de Conception Architecturale Numérique SCAN'10. Marseille, France. décembre 2010.
- Fontoyont, Marc. (1998).** *Daylight performance of buildings.* James and James Publisher.
- Fontoyont, Marc. (1991).** *Le point sur les méthodes de simulation et sur l'utilisation de l'image de synthèse en éclairage.*
- Gagnon, Shirley. (2012).** *Energie solaire et architecture : Les outils numériques et leur utilisation par les architectes pour la conception solaire.* L'Université Laval.
- Gaildrat V. (2003).** *Modélisation déclarative d'environnements virtuels : Création de scène de formes complexes par l'énoncé de propriétés et l'emploi d'interactions gestuelles.* Habilitation à diriger des recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Gallas, M-A. (2009).** *La lumière naturelle en phase de conception : quels méthodes et outils pour l'architecture ?* Mémoire de Master recherche. Nancy. Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (UMR MAP/CRAI)-Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.
- Gallas, M-A., Bur, D & Halin, G. (2010).** *Lumière naturelle et énergie en phase amont de conception. Vers une méthode d'aide à la conception à partir des intentions du concepteur.* In : 4ème Séminaire de Conception Architecturale Numérique. Marseille, France. décembre 2010.
- Gallas, M-A. (2011).** *Fiche d'évaluation des outils de simulation et d'aides à la conception en Architecture.* In : 2011.
- Gallas, M-A. (2013).** *De l'intention à la solution architecturale proposition d'une méthode d'assistance à la prise en compte de lumière naturelle durant les phases amont de conception.* Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- Gaouas, O. (2013).** *Approches multicritères en conception bioclimatique et optimisation par le biais d'un langage architecturale.* Université Mohamed Khider – Biskra.
- Gelfand, L & Corey, F. (2010).** *Sustainable School Architecture: Design for Elementary and Secondary Schools.* Chichester, United Kingdom.352 p.

- Gérard, Pierre (2002).** *Processus de Développement Logiciel Cours M14*, Université de Paris.
- Gilbert, Denyse (1999).** *Guide : la conception d'un site web éducatif*. Université de Laval
- GROUPE HESCHONG MAHON. (1999).** *Daylighting in schools: An Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance*. Ed. Pacific Gas and Electric Company, U.S.A, Juin 1999, p 64
- Habert, O (2015),** Programmation Orientée Objet (POO), Université de Metz.
- Haubruge, C &Magali, B. (2012), Formations METRICS : Modélisation et simulation de l'éclairage naturel au moyen de VELUX DaylightVisualizer**, Université catholique de Louvain.
- Hégron, G. (2003).** *De la modélisation à la conception assistée par ordinateur, La modélisation déclarative*, Annales des ponts et chaussées n° 107-108.
- Hégron, G. (2003).** *Conception architecturale et modélisation déclarative*, CERMA UMR CNRS 1563, École d'Architecture de Nantes
- Higgins, S., Hall, E., Wall, K., Woolner, P. & McCaughey, C. (2005).** *The Impact of School Environments: A literature review. (Commissioned by the Design Council)*. The Centre for Learning and Teaching School of Education, Communication and Language Science. University of Newcastle.
- Hirning, M. (2014).** *The Application of Luminance Mapping to Discomfort Glare: A Modified Glare Index for Green Buildings*. Thèse de doctorat. Queensland University of Technology.
- Houpert, S. (2003).** *Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain : développement et application du logiciel SVR*, Université de Nantes.
- Ibara, D. (2010),** *Using ECOTECH for Exterior Qualitative Solar Analysis: Direct Shading Analysis*. Harvard Design School.
- IESNA Illuminating Engineering Society of North America (2000).** *Lighting hand book*. 9th edition.
- Iturra, E-M. (2011).** *Impact de la configuration des bâtiments scolaires sur leur performance lumineuse, thermique et énergétique. Mémoire de master. Faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels*. Université de Laval. Québec.
- Jolivet, V ; Plemenos, D. & Poulingeas, P. (2002).** *Inverse direct lighting with. Lavoisier*. 302 p.
- Kacher, S. (2005).** *Proposition d'une Méthode de Référencement d'images pour assister La Conception Architecturale : Application à la recherche d'ouvrages*. Thèse Doctorat. L'Institut National Polytechnique de Lorraine.

- Liébard, Alain & André De Herde. (2006).** *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable.* Le Moniteur.
- Leigh, R & Taylor, R. (2009).** *Architecture scolaire : des exemples à suivre en Australie.* OCDE.
- Leroy, A (2005).** *L'architecture écologique UE développement durable.* Licence 3 génie civil. Université la rochelle.
- Lépine, P (2011).** *La diversité environnementale en architecture : potentiel de l'image numérique pour l'exploration des ambiances lumineuses et thermiques in situ.* Maîtrise en sciences de l'architecture. Université de Laval.
- Lesage, K. (2013).** *La lumière naturelle favorise-t-elle la création d'un environnement sain et confortable pour les occupants des bâtiments écologiques certifiés ?* Essai, maîtrise en environnement. Université de Sherbooke, Canada.
- Karoui, H. (2012).** *Sensibilité aux ambiances lumineuses dans l'architecture des grandes demeures husseinites du XVIIIe - début XIXe siècles.* Thèse de Doctorat en « Sciences de l'Architecture ». Ecole Nationale D'Architecture et D'Urbanisme de TUNIS.
- Maamari, F. (2005).** *La simulation numérique de l'éclairage : limites et potentialités.* Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Magali, B. (2002).** *Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physique, économique et écologique pour un meilleur confort visuel et thermique,* thèse de doctorat. Université Catholique de Louvain.
- Marie-paca lecorcuff. (2007).** *Penser l'espace et les formes.* Thèse de doctorat. Université de Rennes 2.
- Maurice, M. (2005).** *Une école pour réussir.* Éditions Le Harmattan, Paris, 2005.
- Marin, P. (2010).** *Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale : Mise en œuvre d'un algorithme génétique guidé par les qualités solaires passives de l'enveloppe.* Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France.
- Marty, C., Fontoynt, M., Christoffersen, J., Dubois, M-C., Wienold, J., & Osterhaus, W. (2003).** *User assessment of visual comfort: Review of existing methods.* Energy, Environment and Sustainable Development Program (1998-2002). EuropeanCommunity.
- Miguet, F. (2000).** *Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain,* Ecole d'architecture de Nantes.
- Minier, F. (2001).** Hygiène et sécurité, note d'information. n°20. Académie d'orléans-Tours.

- Narboni, R. (2006).** *Lumière et ambiances : Concevoir des éclairages pour l'architecture et la ville.* Le Moniteur Editions.
- Oosterhaus, W& Bailey, I. (1992).** *Large Area Glare Sources and their Effect on Discomfort and Visual Performance at Computer Workstations.* Lawrence Berkeley National Laboratory. California.
- OECD. (2000).** *Architecture et apprentissage 55 établissements d'enseignement exemplaires.* PEB. Edition, OECD.
- Pineault, N. (2009).** *Effets des types de vitrage sur la qualité de l'éclairage naturel : Étude expérimentale à l'aide d'une maquette à échelle réduite d'une salle de séjour.* Mémoire de maîtrise. UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC.
- Paul, B & Scartezzini, J. Leso-DIAL. (1990).** *Outil d'aide à la conception en éclairage naturel.* Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment, LESO-PB / EPFL, CH-1015 Lausanne.
- Paule & R. Compagnon and J.L Scartezzini (1995),** *toward a new daylighting design computer tool Proceedings of the Right.* Light 3 Conference, Newcastle, England.
- Paule, B. (2003).** *Éclairagisme, éléments de base.* École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.
- Paule, B. (2007).** *La lumière dans l'architecture : Espace et lumière : Le projet d'éclairage*
- Sigrid Reiter& André de Herd (2004),** *éclairage naturel des bâtiments,* UCL presses universitaires de Louvain.
- Roth, A., (1966).** *La nouvelle école.* Ed. Zurich.
- Roditi, David. (2011).** *ventilation et lumière naturelle.* Eyrolles.164p.
- Saffidine, R, D. (2001).** *Les problèmes de l'ensoleillement dans les salles de classe des nouvelles écoles primaires à Constantine.* Thèse de doctorat. Université de Constantine.
- Santiago L. Torres, V and Sakamoto, Y. (2007).** *Facade design optimization for daylight with a simple genetic algorithm,* Proceedings: *Building Simulation.*
- Scaletsky, C-C. (2003).** *Rôle des références dans la conception initiale en architecture : Contribution au développement d'un Système Ouvert de Références au Projet d'Architecture– le système " kaléidoscope ".* Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Shelby, D & Reinhart, Ch. (2010).** *Dynamic Range Imaging & Glare Analysis.* Harvard Graduate School of Design.
- Seda, K & Benson, L. (2013).** *Investigation of the Luminous Environment in Louis I. Kahn's Kimbell Art Museum A qualitative and quantitative study.* PLEA2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany 10-12 September 2013

Siret, D. (1997). *Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural : application à l'ensoleillement.* Thèse de doctorat. Université de Nantes- ISITEM-École d'Architecture de Nantes. Nantes, France

Tourre, V. (2007). *Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural.* Thèse de doctorat. Université de Nantes. Nantes, France.

Tornay, N. (2010). *vers des outils d'aide à la conception pour intégrer les dimensions techniques, écologique et sensible des matériaux de construction.* Université de TOULOUS.

Turot, F. (2008). *La lumière et l'homme dans l'architecture : Le cas de l'Université Paris 10 Nanterre.* Ecole Supérieure Nationale d'Architecture de Paris La Villette.

Tedeschi, A. (2011). *Parametric architecture with Grasshopper®: primer.* Brienza, Italy : Le Penseur. ISBN 9788895315102.

Thiry, J-D. (2014). *les mécanismes de lumière naturelle analyse des bibliothèques d'Alvar Alto,* Revue E tijdschrift, 2014.

Websites et sitologie :

AUDIENCE. Cerma [en ligne]. (page consulté le 10/11/2015).
<http://audience.cerma.archi.fr/>

COMPUTERHOPE [en ligne]. (page consulté le 11/09/2015).
<http://www.computerhope.com/msdos.htm>

D-LITE. [En ligne]. (Page consulté le 15/06/2014). <http://www.d-lite.org/>

Daylight design variation book [en ligne]. (Page consulté le 18/09/2016).
http://jandiepens.nl/varbook/overzicht_plaats.html

ESTIA. dial-europee [en ligne]. (page consulté le 10/11/2015). <http://www.estia.ch/dial-europee.html>

INTERIEURITES. Tadao-ando-architecte-de-la-lumiere [en ligne]. (Page consulté le 10/11/2015) <http://interieurites.com/tadao-ando-architecte-de-la-lumiere/>

GRENOBLE. Cours-en-lignedetail.php [en ligne]. (Page consulté le 30/12/2015)
<http://www.grenoble.archi.fr/etudes/cours-en-lignedetail.php?ref=balez-cours>.

OPENCLASSROOMS. [En ligne]. (Page consulté le 10/11/2015).
<https://openclassrooms.com>

SIH. [En ligne]. (Page consulté le 11/09/2015).
http://www.sih.fr/sites/default/files/actualite-documents/lumiere_naturelle_sante_giflumiere_preventica_strasbourg.pdf

STS. Daylight/varbook [en ligne]. (page consulté le 10/12/2014).

<http://sts.bwk.tue.nl/daylight/varbook/index.htm>

Organisme professionnels

ACE association des concepteurs lumière et éclairagistes [en ligne]. (Page consulté le 30/12/2015). www.ace-fr.org

AEF. Association franchise de l'éclairage [en ligne]. (Page consulté le 29/03/2015). www.afe-éclairage.com.fr

ELC Europeanlightingcouncil Belgique syndicate de l'éclairage [en ligne]. (page consulté le 30/12/2015). www.syndicat-éclairage.com

ELDA plus Europeanlightingdesgner's Association [en ligne]. (Page consulté le 31/12/2014). www.eldaplus.net

Annexes

Annexe 01 : les caractéristiques physiques, physiologiques, photométriques de la lumière naturelle

Les caractéristiques physiques de la lumière

La représentation physique de la lumière, par des modèles et des phénomènes optiques, est le résultat de plus de vingt siècles d'interrogations. La définition de la lumière à l'heure actuelle peut se résumer à :

Lumière : n. f. Ensemble des rayonnements électromagnétiques visibles, c'est-à-dire susceptible d'être perçus directement par un œil humain, dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 400 *nm* et 700 *nm*.

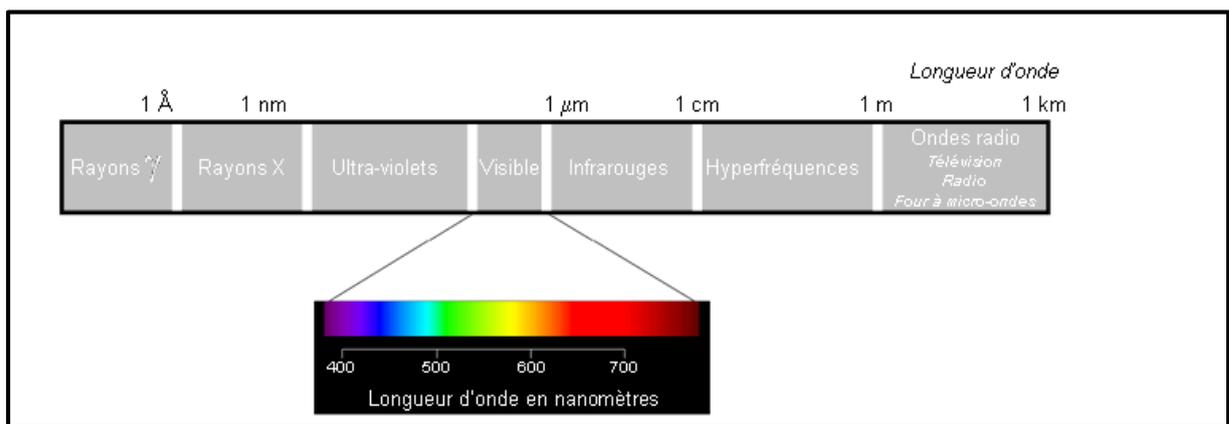


Figure 111 : le spectre électromagnétique qui classe les rayonnements en fonction de leur longueur d'onde (Source : <http://e-cours.univ-paris1.fr/>)

Modèles optiques

La nature de la lumière a été l'objet de nombreuses spéculations, essentiellement dues à la dualité onde-corpuscule de la lumière.

Optique géométrique : Dans l'optique géométrique, la lumière est un ensemble de rayons formés de particules qui se déplacent en ligne droite. Il repose sur deux lois fondamentales :

Le principe de la propagation rectiligne dans un milieu transparent, homogène et isotrope, et le principe du retour inverse.

Les lois de Descartes, associées à ce modèle, permettent de décrire les phénomènes de réflexion et de réfraction.

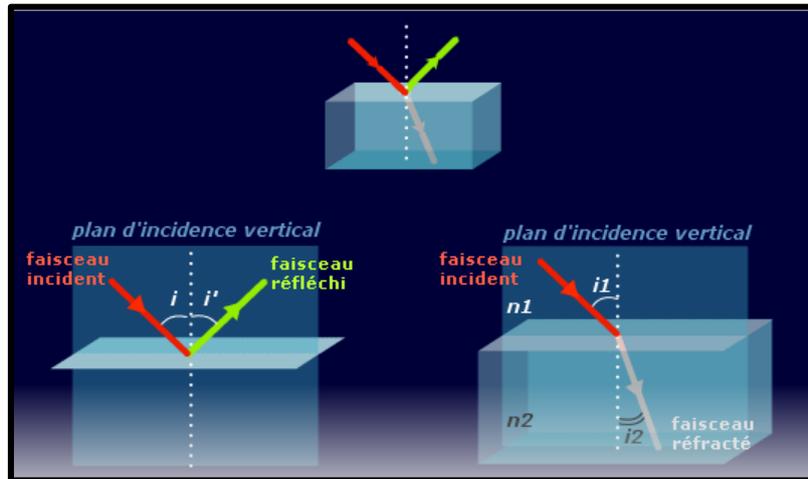


Figure 112 : loi de Descartes (source : maxicours.com)

Optique ondulatoire : Dans l'optique ondulatoire, la lumière est une onde électromagnétique qui se propage dans le vide avec une vitesse finie. La lumière visible est caractérisée par une longueur d'onde entre 400 nm et 700 nm.

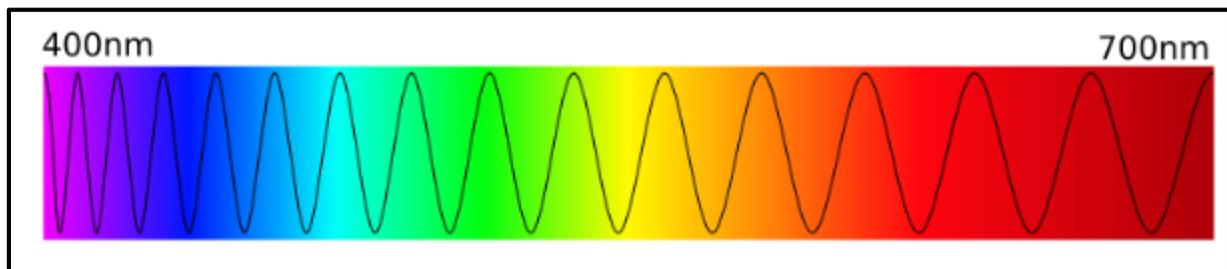


Figure 113 : Nature ondulatoire de la lumière naturelle
(Source : podcastscience.fm)

Optique quantique : L'optique quantique est une reformulation de l'optique ondulatoire dans laquelle le champ électromagnétique est quantifié : la lumière apparaît comme un flux discontinu de photons. L'optique quantique permet de modéliser de manière générale les interactions entre la lumière et la matière (émission, absorption).

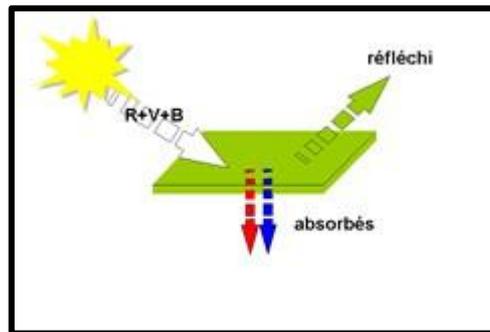


Figure 114 : émission, absorption de la lumière naturelle (source : <http://phozagora.free.fr/>)

Phénomènes optiques

Propagation : Dans le modèle géométrique, la propagation de la lumière peut être vue au niveau macroscopique comme des particules se déplaçant en ligne droite. Ces lignes sont des rayons lumineux, qui forment des faisceaux lumineux lorsqu'ils sont regroupés.

Dans le modèle ondulatoire, la propagation de la lumière est une propagation d'onde dont la vitesse ($c = 299\,792\,458$ m/s) est une constante universelle. La polarisation est une propriété des ondes vectorielles, comme la lumière, et caractérise l'orientation de ses vecteurs autour de l'axe de propagation de l'onde. Les phénomènes de réflexion et de réfraction peuvent transformer la polarisation de la lumière.

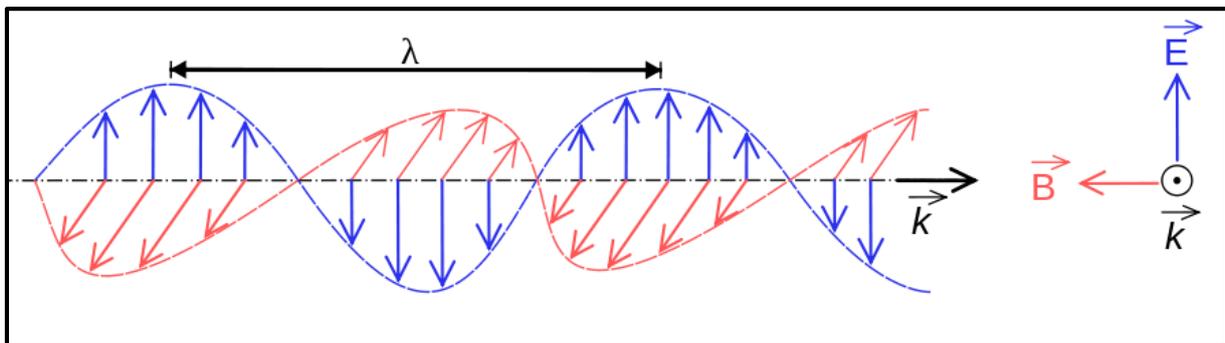


Figure 115 : Schéma montrant une onde électromagnétique plane (source : <http://sesp.esep.pro/>)

Interactions Lorsque la lumière rencontre un obstacle, des interactions apparaissent entre la lumière et la matière. De nombreux effets sont mis en évidence selon que la lumière est renvoyée, transmise, absorbée et selon la taille de l'objet rencontré. Ces interactions, qui transforment la lumière, nous permettent de voir les objets : lorsque les effets provoqués par un phénomène optique sont perceptibles, ils participent à la composition des effets visuels.

Réflexion La réflexion, en optique géométrique, suit les lois de Descartes. C'est la déviation d'un rayon par une surface parfaitement lisse qui renvoie ce rayon selon un angle égal à l'angle d'incidence.

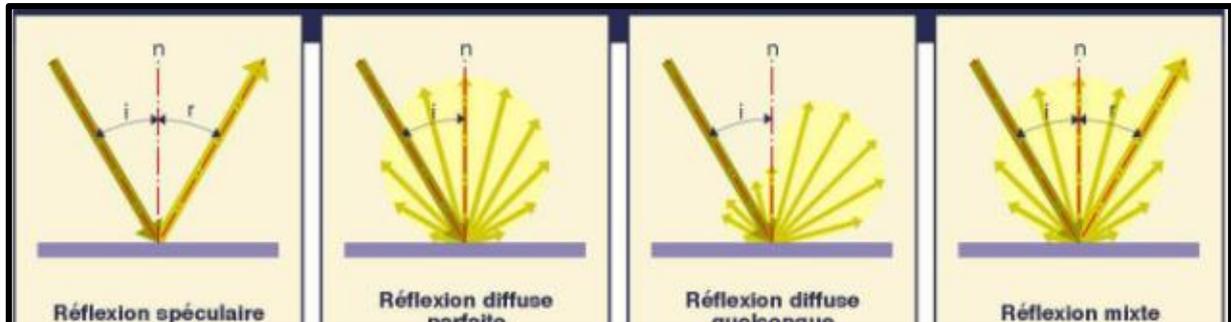


Figure 116 : phénomène de réflexion (source : <http://www.guide-clea.fr/>)

Réfraction La réfraction suit aussi les lois de Descartes et caractérise le changement de direction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un milieu transparent à un autre. La déformation de l'aspect des objets dû à ce phénomène est à l'origine du mot réfraction (fracture).

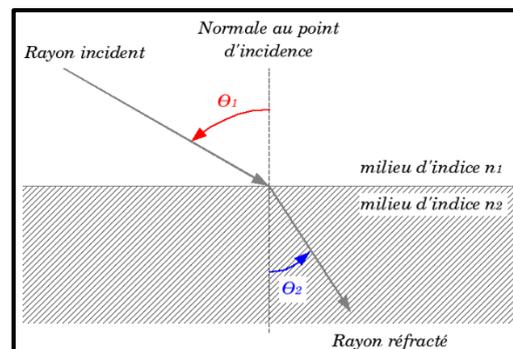


Figure 117 : phénomène de Réfraction (source : wixsite.com)

Diffraction Le phénomène de diffraction est créé par la déviation des ondes lumineuses lorsqu'elles rencontrent un obstacle. Chaque point de l'obstacle diffuse l'onde qu'il reçoit, et la densité de l'onde n'est pas conservée selon les lois de l'optique géométrique. La diffraction d'une onde lumineuse dépend du rapport entre sa longueur d'onde et la taille de l'obstacle.

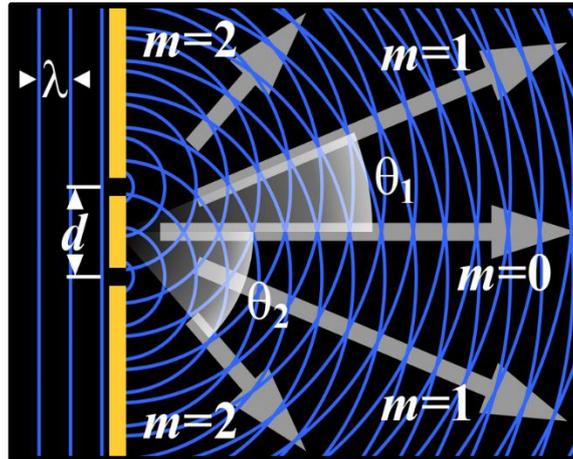


Figure 118 : Phénomène de Diffraction wikipedia.org

Absorption L'absorption correspond à la capture de photons par la matière. Ce qui peut se traduire par l'échauffement d'une masse de matière ou par la production d'un courant électrique. Par exemple, l'effet photoélectrique, mesuré en volt, est l'émission d'électrons par un matériau lorsque celui-ci est exposé à la lumière.

Émission L'émission de lumière est une libération d'énergie sous la forme de photons. On observe divers phénomènes d'incandescence ou de luminescence, suivant la nature de l'excitation qui apporte l'énergie nécessaire à la libération de photons.

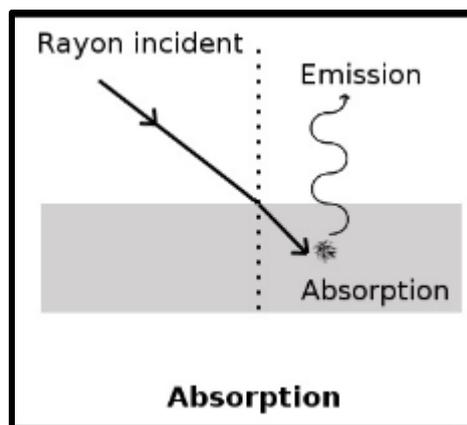


Figure 119 : Absorption et Emission (source : clenet.com)

Les caractéristiques physiologiques de lumière

C'est l'œil qui fait la lumière. R. Barjaval.

La lumière représente une partie indéniable du vécu et nous influence du point de vue physiologique et psychologique. Les composants biologiques du système visuel humain forment une chaîne de traitement de l'information lumineuse (Tourre, 2007). L'importance de la perception visuelle chez l'être humain a été démontrée par des arguments physiologiques, et plus précisément par l'évolution de la position des yeux dans la boîte crânienne et le développement des performances de l'œil (Gibson, 1986 cité par Tourre, 2007). Cet œil qu'il soit ouvert ou fermé capte la lumière du jour grâce à des neurones spécifiques qui vont ensuite transmettre cette information au cerveau et ainsi affecter de nombreuses fonctions biologiques, comme le rythme cardiaque, la température corporelle, ou la synthèse d'enzymes et d'hormones. L'action de la rétine va ainsi contrôler la libération de corticoïdes ou cortisol et la synthèse par la glande pinéale d'une hormone la mélatonine. C'est elle qui renseigne notre corps sur la longueur du jour et de la nuit (Zemmouri M, 2013).

Le manque de lumière peut affecter l'être humain en provoquant chez lui certaines sensations comme la baisse de vitalité, les troubles du sommeil ou encore la dépression saisonnière. La lumière du soleil entre par les yeux et atteint la rétine, ce signal nous permet de régler notre rythme biologique éveil-sommeil. Le manque de soleil provoque donc ce qu'on appelle le dérèglement de l'horloge biologique interne qui peut causer une dépression un "blues hivernal", qui se produit généralement entre octobre et mars pendant les jours les plus courts de l'année, il provoque également des troubles du sommeil et de l'humeur, une perte d'énergie et de motivation de la fatigue . En moyenne les êtres humains ont besoin d'un minimum de 2500 lux de lumière pendant au moins 2h par jour pour se sentir en forme (Zemmouri M, 2013).

L'œil et la vision

Alhazen (956-1038) utilise déjà un modèle proche du modèle sténopé pour représenter l'œil. La preuve de cette idée est apportée par Scheiner en 1625, qui observe la formation de l'image rétinienne et démontre que l'œil est comparable à une chambre noire. Si l'on considère une modélisation simple de l'œil, l'iris joue le rôle de régulateur d'intensité, et le cristallin celui de lentille convergente (Tourre, 2007).

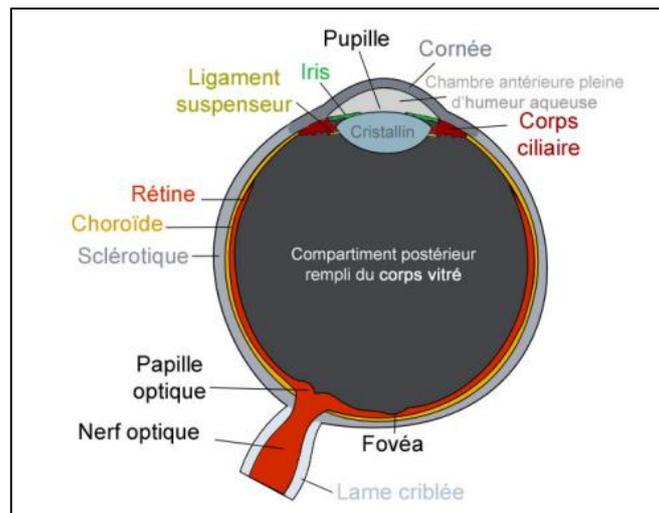


Figure 120 : Biologie de l'œil (Wikipedia)

Cet organe est muni de :

La cornée : c'est la paroi transparente bombée de l'œil.

Le cristallin : Le cristallin est constitué d'une lentille biconvexe (sorte de bille ovale). C'est une lentille déformable qui peut s'aplatir ou s'épaissir selon les besoins pour permettre, la mise au point appelée accommodation.

L'iris : c'est un véritable diaphragme musculaire ; c'est la partie colorée de l'œil, elle est percée en son centre d'un orifice : la pupille son diamètre peut varier de 3 à 8 mm pour laisser passer plus au moins de lumière.

La pupille : c'est le diaphragme par lequel pénètre la lumière, les émotions, les médicaments, les maladies neurologiques peuvent troubler son fonctionnement.

La rétine : c'est une membrane photosensible (sensible à la lumière), semblable à la pellicule photographique, elle est tapissée de cellules nerveuses réceptrices. Ces dernières ont pour rôle de percevoir les couleurs et formes qui composent les images. La rétine est composée de trois zones : la fovéa, la macula et la périphérie.

Le globe oculaire : il est contenu dans une membrane très solide qui constitue le blanc de l'œil ou sclérotique, celle-ci devient transparente vers l'avant pour donner la cornée.

L'humeur aqueuse : c'est un liquide transparent qui est continuellement renouvelé avec qui l'humeur vitrée maintient la pression oculaire

L'humeur vitrée : elle représente 90% du volume de l'œil, elle est gélatineuse, elle maintient la rétine contre les parois de l'œil.

La vision débute avec l'entrée des rayons de la lumière dans l'œil à travers la cornée, le premier tissu transparent puis, les rayons passent à travers la pupille, cette ouverture ronde au

centre de l'iris, la partie colorée de l'œil. La pupille varie de grandeur suivant la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil. Les rayons passent ensuite à travers le cristallin qui, en modifiant sa forme, focalise les rayons suivant l'objet regardé : c'est la mise à foyer de l'œil, enfin la lumière atteint la rétine. Cette dernière opère une sélection des propriétés du signal selon la nature et la densité des photorécepteurs qui la composent ; Les bâtonnets sont très sensibles à l'intensité lumineuse et à la totalité du spectre visible, ils sont répartis uniformément sur la rétine et permettent une vision nocturne en niveau de gris. Les cônes sont sensibles à de fortes intensités lumineuses, sur une partie du spectre visible (rouge, vert ou bleu) et permettent une vision diurne en couleur. Son énergie excite les cellules, créant un flux nerveux qui est transmis au cerveau par le nerf optique.

Les caractéristiques photométriques de lumière

Photométrie

La photométrie a été créée en 1760 par Pierre Bouguer, bien avant que les mécanismes de vision soient décrits. C'est la mesure psychophysique de la sensation visuelle produite par le spectre électromagnétique. Les valeurs photométriques tiennent compte de la réponse visuelle de l'observateur. (Vincent Torre, 2007) Pour quantifier et évaluer la lumière d'un point de vue physique, il existe une multitude de paramètres relatifs aux différents éléments constitutifs de la lumière, parmi ces paramètres le flux lumineux, l'intensité lumineuse, l'éclairement et la luminance en sont les principaux pour évaluer la lumière depuis sa source de façon optimale et efficiente. Ces unités sont utilisées dans la physique et sont établies à la base de la courbe de sensibilité spectrale de l'observateur de référence (CIE). Cette dernière relative à l'œil, représente la variation de l'efficacité lumineuse en fonction de la longueur d'onde qui varie pour des valeurs non-nulles allant de 0,38 à 0,78 μm ; en dehors de cet intervalle, les valeurs sont nulles et le maximum de la fonction est situé vers 0,555 μm en éclairage photopique (diurne) et aux environs de 0,5 μm en éclairage scotopique (nocturne). [Narboni, 2006] [eduscol.education.fr]

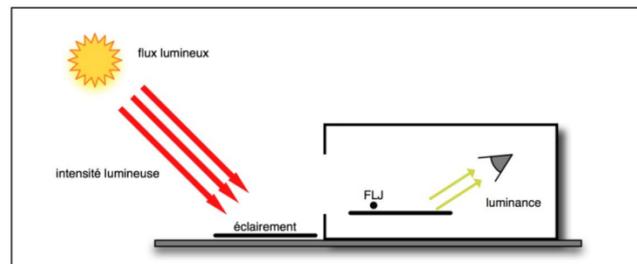


Fig. Types de grandeurs photométriques (GALLAS, 2013)

L'angle solide :

Le flux lumineux : Le flux lumineux constitue le paramètre photométrique du rayonnement lumineux mesuré par taux horaire. L'unité de mesure est le lumen (lm). Le lumen (lm) est le flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle isotrope placée au sommet de cet angle et ayant une intensité lumineuse de 1 candéla. L'instrument utilisé pour sa mesure est le lumenmètre ; un appareil, appelé aussi sphère intégratrice, permet de déterminer le flux lumineux d'une source donnée. Sa valeur varie essentiellement en fonction du temps (heure, jour, mois et saison) du fait de sa relation avec le soleil comme source et elle est exprimée en lumen. (<http://audience.cerma.archi.fr/>)

Intensité lumineuse : Etablie à partir de la notion du flux lumineux et considérée comme la seule véritable nouvelle grandeur qu'introduit la photométrie dans le système international (SI), l'intensité lumineuse est définie comme étant la quantité de flux lumineux dans une direction donnée mesurée en lumens par angle solide. Elle est utilisée pour les calculs d'éclairage ponctuel, représentée par un vecteur en vue de sa dépendance de la direction d'émission et exprimée en candela. La candela (cd) est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.1012 Hz et dont l'intensité énergétique est de $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$. L'instrument utilisé pour sa mesure est les récepteurs photométriques. (<http://audience.cerma.archi.fr/>)

Eclairage :

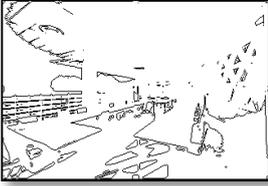
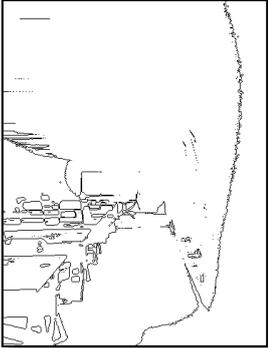
L'éclairage correspond à un flux lumineux reçu par unité de surface (Tregenza et Loe, 1998). Son unité de mesure est le lux (lx) et correspond à un flux lumineux de 1 lumen (lm) couvrant uniformément une surface de 1 m^2 . L'instrument permettant sa mesure est le luxmètre. Ce paramètre peut-être utilisé pour décrire la quantité minimale de lumière requise pour une tâche visuelle spécifique et pour mesurer l'uniformité de la distribution de la lumière (Brandi et al, 2006).

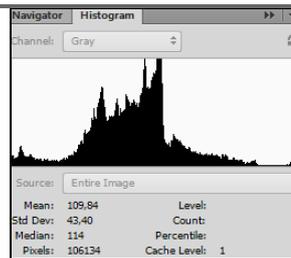
Luminance : La luminance qualifie l'impression reçue par l'œil d'un observateur regardant, dans une direction donnée, une source lumineuse, qu'elle soit primaire ou secondaire et selon qu'elle émet la lumière directement ou par réflexion. Elle dépend de la nature de la surface et des conditions météorologiques (temps sec, pluie, etc.) et elle varie suivant la position de l'observateur. La luminance s'exprime par candela par mètre carré (cd/m^2) ; c'est la lumière émise par une surface dont l'aire apparente est de 1 mètre carré et dont l'intensité est de 1 candela. L'instrument permettant de la mesurer est le luminance-mètre.

Grandeur Unité SI Équivalent radiométrie

Grandeur	Unité (SI)	Équivalent radiométrie
Flux lumineux (F)	<i>lumen</i> (lm)	Flux énergétique
Intensité lumineuse (I)	<i>candela</i> ($cd = lm \cdot sr^{-1}$)	Intensité énergétique
Éclairement (E)	<i>lux</i> ($lm \cdot m^{-2}$)	Éclairement énergétique
Émittance (M)	$lm \cdot m^{-2}$	Émittance énergétique
Luminance (L)	$cd \cdot m^{-2}$	Luminance énergétique

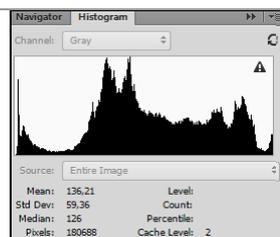
Annexe 02 : les images traitées pas la méthode de Demers

<p>Image 11</p> 			
<p>Image 12</p> 			
			



Mean : 43.07%
Std : 17.01%

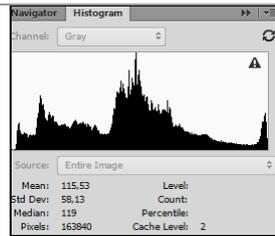
L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 2).



Mean : 53.41%
Std : 23.27%

L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Image se trouve dans la zone contraste (voir Graphe 2).

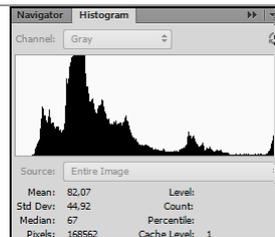
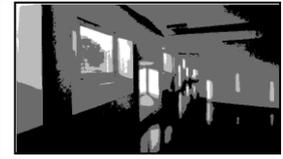
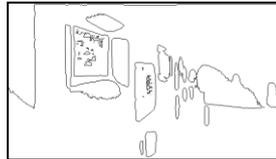
Image 13



Mean : 45.30%
Std : 22.79%

L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 2).

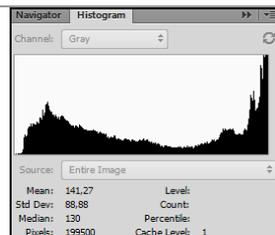
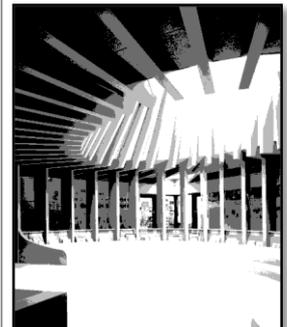
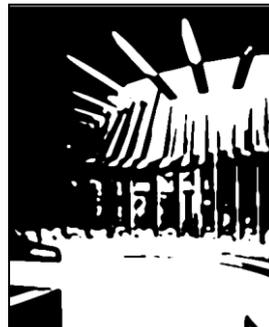
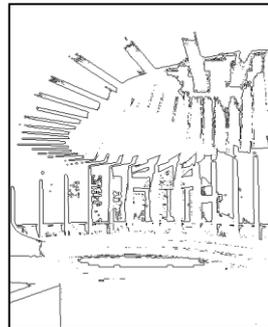
Image 14



Mean : 32.18%
Std : 17.61%

la majorité des pixels est localisée à l'extrémité gauche de l'histogramme (la zone d'ambiance sombre). Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 2)

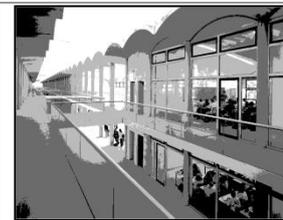
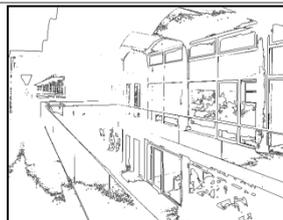
Image 15

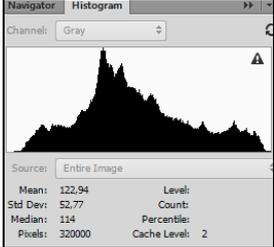
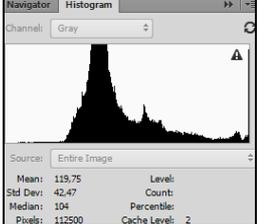
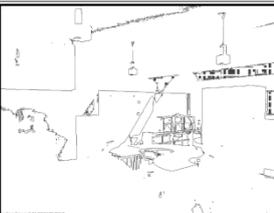
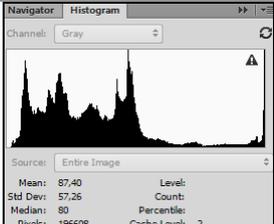


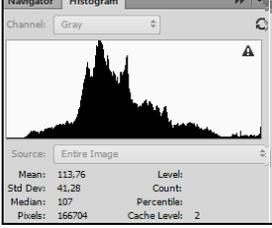
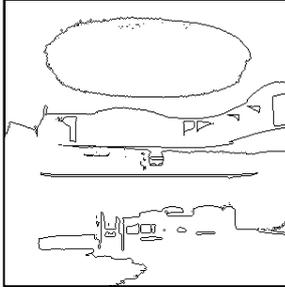
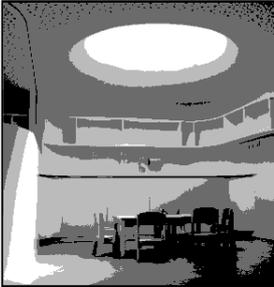
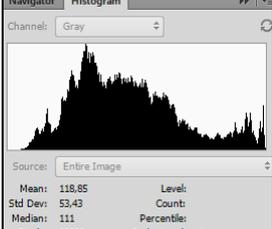
Mean : 55.4%
Std : 34.85%

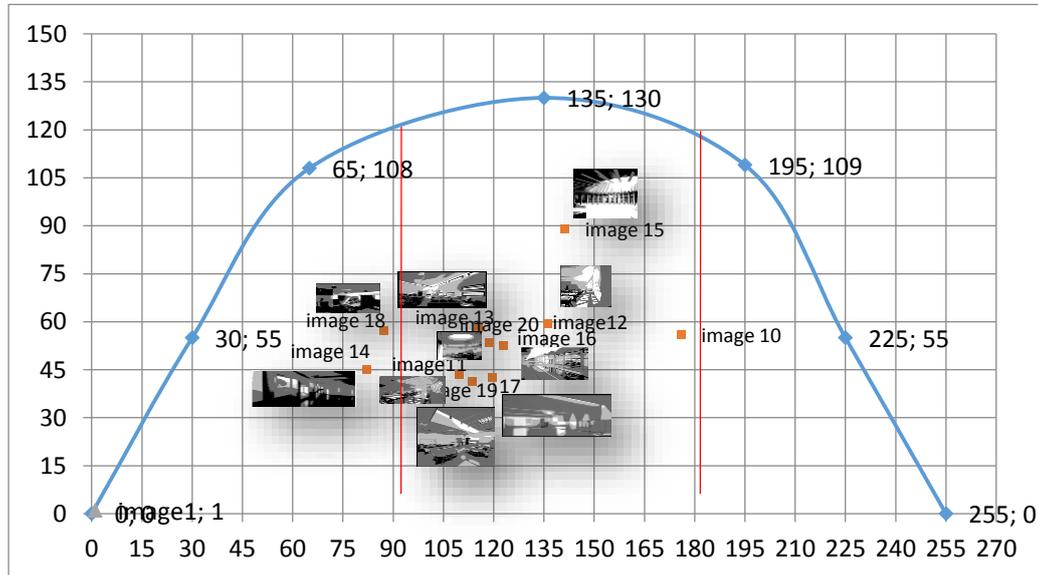
la majorité des pixels est localisée à l'extrême droite de l'abscisse (zone d'ambiance lumineuse claire). Espace lumineux. Image se trouve dans la zone supérieure forte contraste (voir Graphe 2).

Image 16



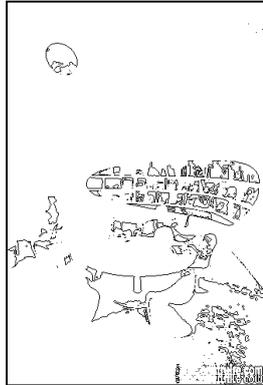
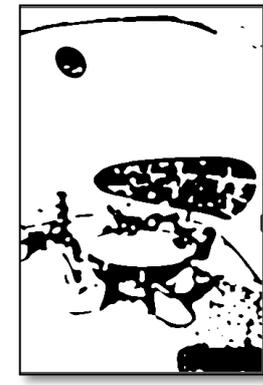
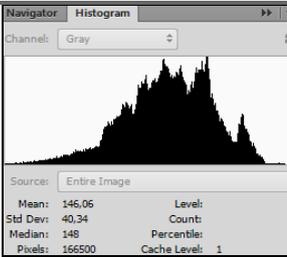
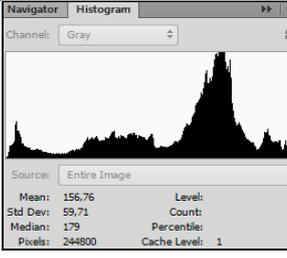
	 <p>Navigator Histogram Channels: Gray Source: Entire Image Mean: 122,94 Level: Std Dev: 52,77 Count: Median: 114 Percentile: Pixels: 320000 Cache Level: 2</p>	<p>Mean : 48.21% Std : 20.69%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 2).</p>	
<p>Image 17</p> 			
<p>Image 17</p>	 <p>Navigator Histogram Channels: Gray Source: Entire Image Mean: 119,75 Level: Std Dev: 42,47 Count: Median: 104 Percentile: Pixels: 112500 Cache Level: 2</p>	<p>Mean : 46.96% Std : 16.65%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 2).</p>	
<p>Image 18</p> 			
<p>Image 18</p>	 <p>Navigator Histogram Channels: Gray Source: Entire Image Mean: 87,40 Level: Std Dev: 57,26 Count: Median: 80 Percentile: Pixels: 196608 Cache Level: 2</p>	<p>Mean : 34.27% Std : 22.45%</p> <p>la majorité des pixels est localisée à l'extrémité gauche de l'histogramme (la zone d'ambiance sombre). Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 2)</p>	
<p>Image 19</p> 			

	 <p>Channel: Gray Source: Entire Image Mean: 113.76 Level: Std Dev: 41.28 Count: Median: 107 Percentile: Pixels: 166704 Cache Level: 2</p>	<p>Mean : 44.61% Std : 16.18%</p> <p>L’histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l’image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 2).</p>	
<p>Image 20</p> 			
	 <p>Channel: Gray Source: Entire Image Mean: 118.85 Level: Std Dev: 53.43 Count: Median: 111 Percentile: Pixels: 89999 Cache Level: 1</p>	<p>Mean : 46.60% Std : 20.95%</p> <p>L’histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l’image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 2).</p>	



Graph 3 : Classification des ambiances lumineuses d’une image par la relation entre la brillance (moyenne) et le contraste (écart type) (source : auteur)

L'analyse quantitative (Graphe 3) montre des niveaux de brillance allant de 32 % (sombre) à 55.4% (claire) et des degrés de contraste est moyen observé sur la majorité des photographies, s'échelonnant de 41.28 (faiblement contrasté) à 88.88 (contrasté)

			
<p>Image 21</p>	 <p>Navigator Histogram Channel: Gray Sources: Entire Image Mean: 146.06 Level: Std Dev: 40.34 Count: Median: 148 Percentile: Pixels: 166500 Cache Level: 1</p>	<p>Mean : 57.25% Std : 15.81%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace lumineux. Image se trouve dans la zone inférieure faible contraste (voir Graphe 3).</p>	
<p>Image 22</p> 			
	 <p>Navigator Histogram Channel: Gray Sources: Entire Image Mean: 156.76 Level: Std Dev: 59.71 Count: Median: 179 Percentile: Pixels: 244800 Cache Level: 1</p>	<p>Mean : 61.47% Std : 23.41%</p> <p>la majorité des pixels est localisée à l'extrême droite de l'abscisse (zone d'ambiance lumineuse claire). Espace lumineux. Image se trouve dans la zone supérieure forte contraste (voir Graphe 3).</p>	
<p>Image 23</p>			

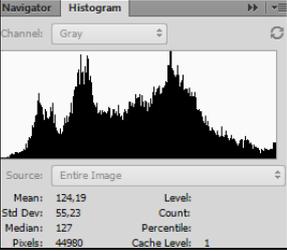
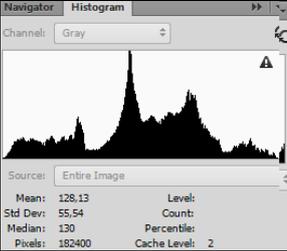
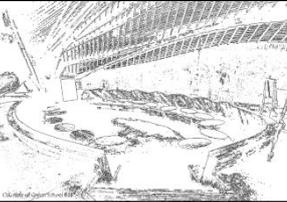
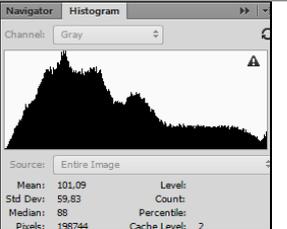
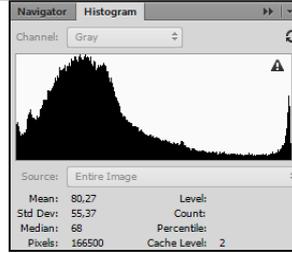
	 <p>Navigator Histogram</p> <p>Channel: Gray</p> <p>Source: Entire Image</p> <p>Mean: 124,19 Level:</p> <p>Std Dev: 55,23 Count:</p> <p>Median: 127 Percentile:</p> <p>Pixels: 44980 Cache Level: 1</p>	<p>Mean : 48.70%</p> <p>Std : 21.65%</p> <p>L’histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l’image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone contraste (voir Graphe 3).</p>
<p>Image 24</p> 	  <p>Navigator Histogram</p> <p>Channel: Gray</p> <p>Source: Entire Image</p> <p>Mean: 128,13 Level:</p> <p>Std Dev: 55,54 Count:</p> <p>Median: 130 Percentile:</p> <p>Pixels: 182400 Cache Level: 2</p>	  <p>Mean : 50.24%</p> <p>Std : 21.78%</p> <p>L’histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l’image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace lumineux, Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 3).</p>
<p>Image 25</p> 	  <p>Navigator Histogram</p> <p>Channel: Gray</p> <p>Source: Entire Image</p> <p>Mean: 101,09 Level:</p> <p>Std Dev: 59,83 Count:</p> <p>Median: 88 Percentile:</p> <p>Pixels: 198744 Cache Level: 2</p>	  <p>Mean : 39.64%</p> <p>Std : 23.46%</p> <p>L’histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l’image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone inférieure de fort contraste (voir Graphe 3).</p>
		 

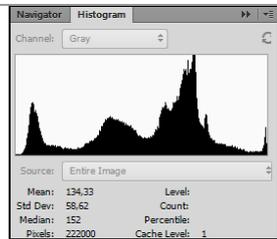
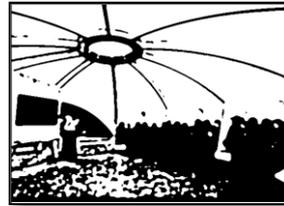
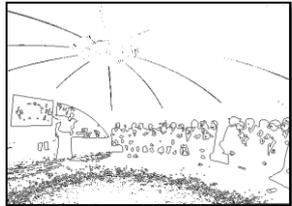
Image 26



Mean : 31.47%
Std : 21.71%

la majorité des pixels est localisée à l'extrémité gauche de l'histogramme (la zone d'ambiance sombre). Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 3)

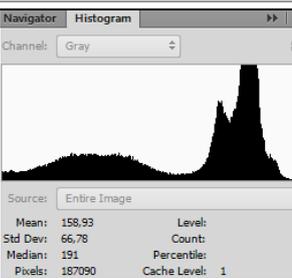
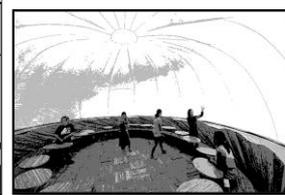
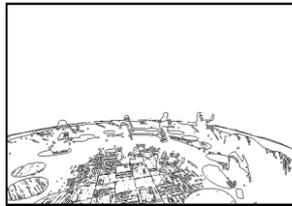
Image 27



Mean : 52.67%
Std : 22.98%

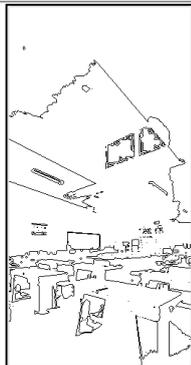
L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace lumineux. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 3).

Image 28

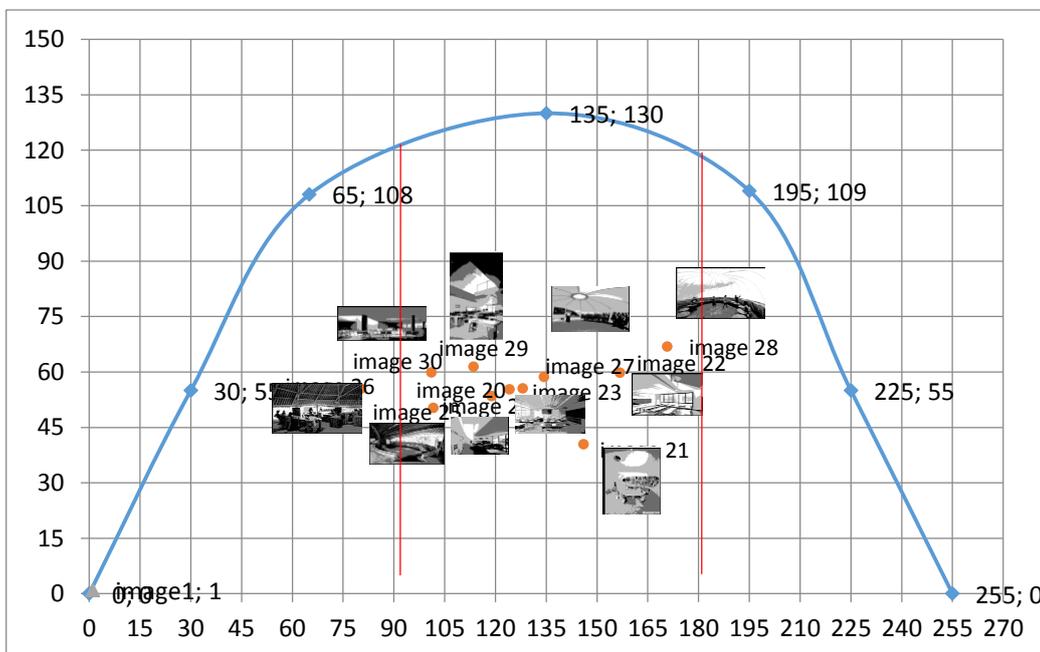


Mean : 62.32%
Std : 26.18%

la majorité des pixels est localisée à l'extrême droite de l'abscisse (zone d'ambiance lumineuse claire). Espace lumineux. Image se trouve dans la zone supérieure forte contraste (voir Graphe 3).



	<p>Navigator Histogram Channel: Gray Source: Entire Image Mean: 113,52 Level: Std Dev: 61,38 Count: Median: 115 Percentile: Pixels: 125000 Cache Level: 1</p>	<p>Mean : 44.51% Std : 24%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone forte de contraste (voir Graphe 3).</p>	
<p>Image 30</p>			
<p>Navigator Histogram Channel: Gray Source: Entire Image Mean: 101,64 Level: Std Dev: 50,25 Count: Median: 88 Percentile: Pixels: 187985 Cache Level: 1</p>	<p>Mean : 39.85% Std : 19.70%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 3).</p>		



Graph 4 : Classification des ambiances lumineuses d'une image par la relation entre la brillance (moyenne) et le contraste (écart type) (source : auteur)

L'analyse quantitative (Graphe 4) montre des niveaux de brillance allant de 31 % (sombre) à 62% (claire) et des degrés de contraste est moyen observé sur la majorité des photographies, s'échelonnant de 55.18 (faiblement contrasté) à 66.78 (contrasté)

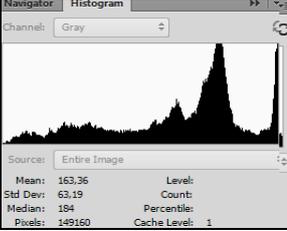
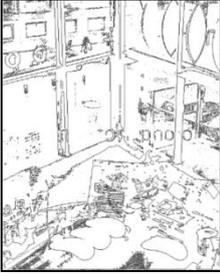
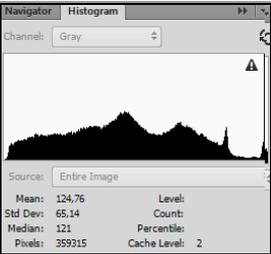
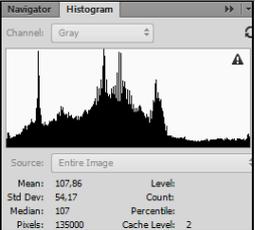
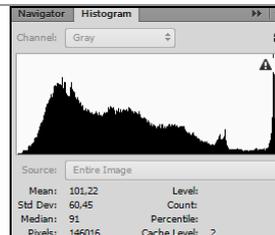
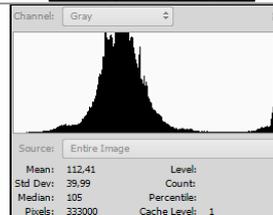
<p>Image 31</p> 	  <p>Mean : 64.06% Std : 24.78%</p>	  <p>la majorité des pixels est localisée à l'extrême droite de l'abscisse (zone d'ambiance lumineuse claire). Espace lumineux. Image se trouve dans la zone supérieure forte contraste (voir Graphe 4).</p>
<p>Image 32</p> 	  <p>Mean : 48.92% Std : 25.54%</p>	  <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyenne sombre. Image se trouve dans la zone de contraste fort (voir Graphe 4).</p>
<p>Image 33</p> 	  <p>Mean : 42.29% Std : 21.24%</p>	  <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 4).</p>

Image 34



Mean : 39.69%
Std : 23.70%

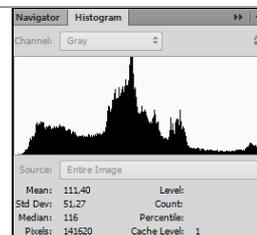
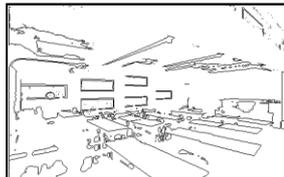
L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 4).



Mean : 40.08%
Std : 15.68%

L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste faible (voir Graphe 4).

Image 36



Mean : 43.68%
Std : 20.10%

L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 4).

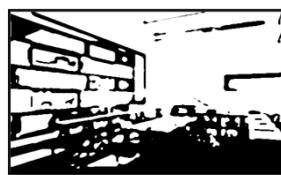
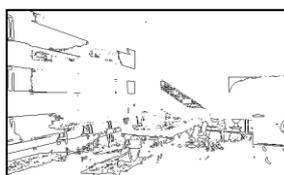
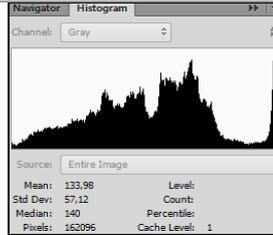


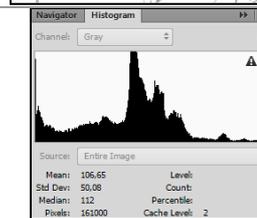
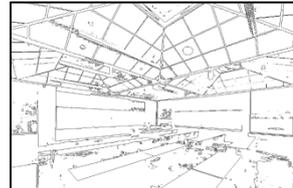
Image 37



Mean : 52.54%
Std : 22.4%

L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace lumineux. Image se trouve dans la zone de contraste faible (voir Graphe 4).

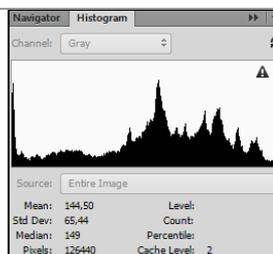
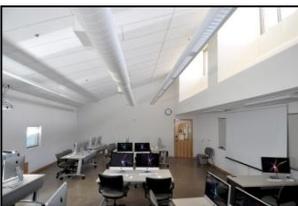
Image 38



Mean : 41.82%
Std : 19.63%

L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyenne sombre. Image se trouve dans la zone de contraste faible (voir Graphe 4).

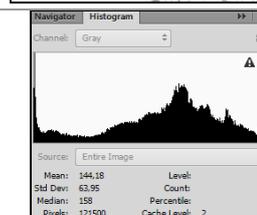
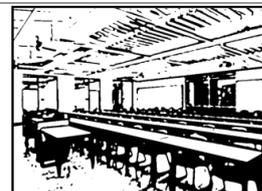
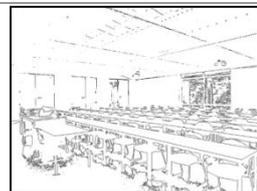
Image 39



Mean : 56.66%
Std : 25.66%

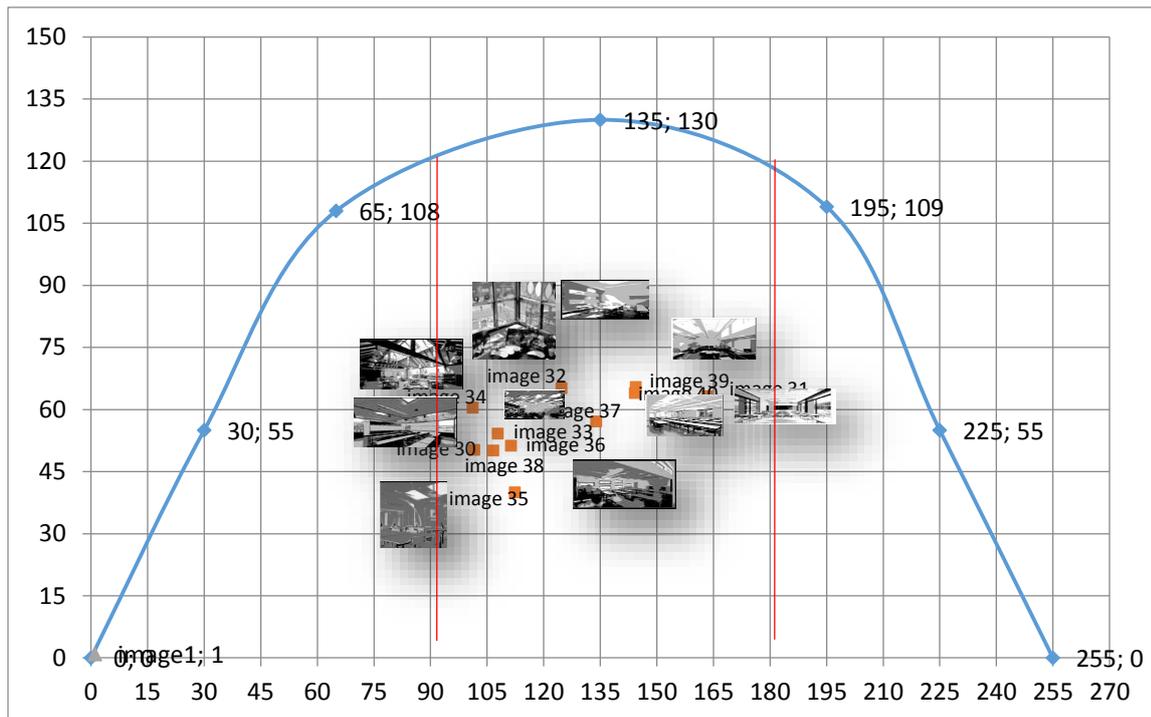
L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace lumineux. Image se trouve dans la zone de fort contraste (voir Graphe 4).

Image 40



Mean : 56.54%
Std : 25.07%

L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace lumineux. Image se trouve dans la zone de fort contraste (voir Graphe 4).



Graph 5 : Classification des ambiances lumineuses d'une image par la relation entre la brillance (moyenne) et le contraste (écart type) (source : auteur)

L'analyse quantitative (Graph 4) montre des niveaux de brillance allant de 39% (moyenne) à 64% (claire) et des degrés de contraste est moyen observé sur la majorité des photographies, il s'échelonnant de 39 (faiblement contrasté) à 65 (contrasté).

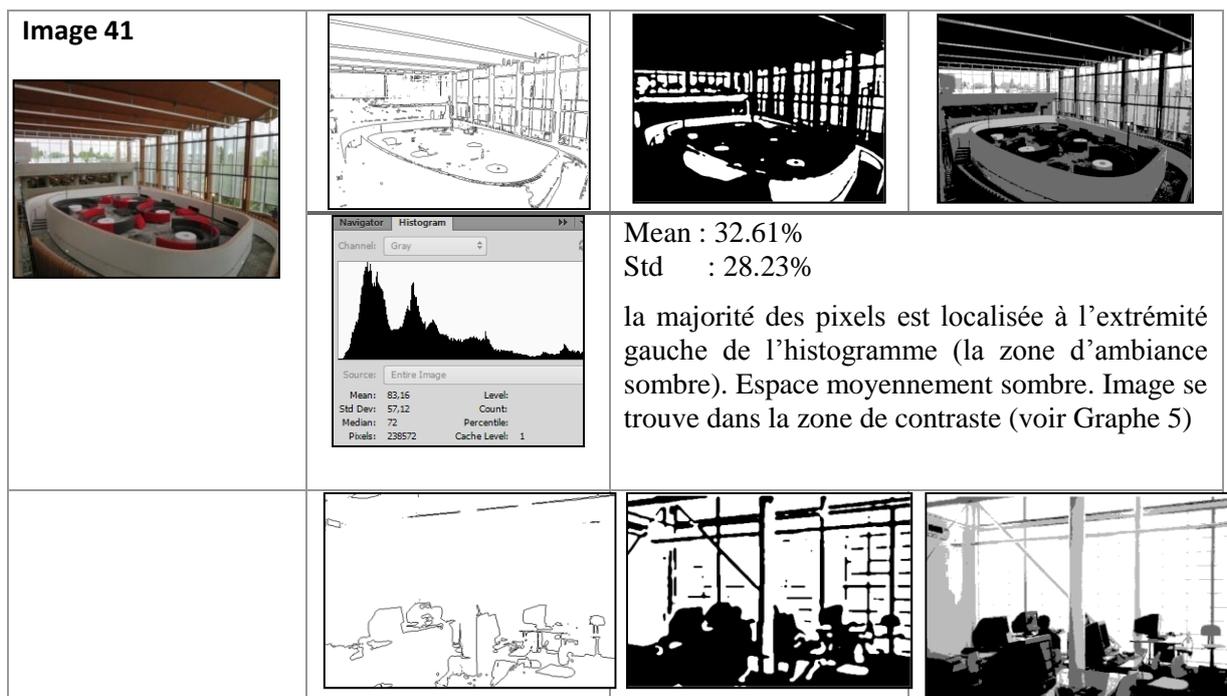
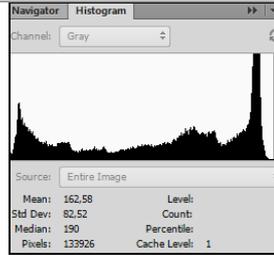


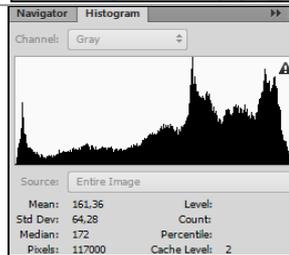
Image 42



Mean : 63.75%
Std : 32.36%

la majorité des pixels est localisée à l'extrême droite de l'abscisse (zone d'ambiance lumineuse claire). Espace lumineux. Image se trouve dans la zone supérieure forte contraste (voir Graphe 5).

Image 43



Mean : 63.27%
Std : 25.20%

la majorité des pixels est localisée à l'extrême droite de l'abscisse (zone d'ambiance lumineuse claire). Espace lumineux. Image se trouve dans la zone supérieure forte contraste (voir Graphe 5).

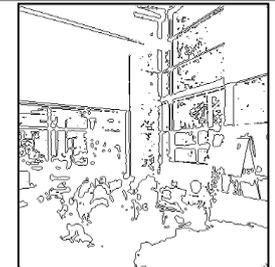
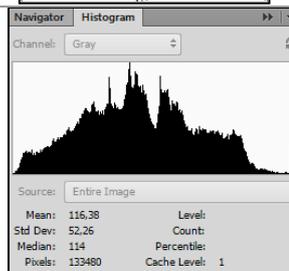
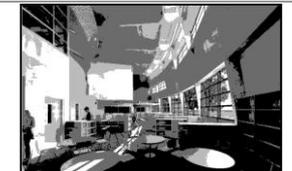
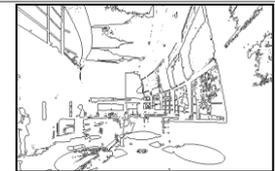


Image 44



Mean : 45.63%
Std : 20.49%

L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de contraste (voir Graphe 5).



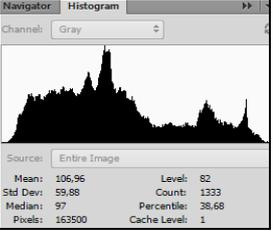
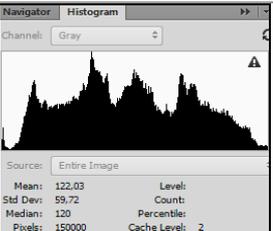
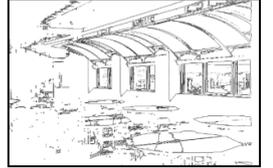
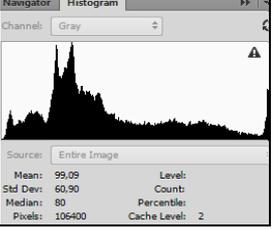
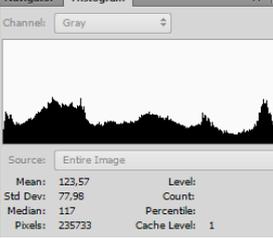
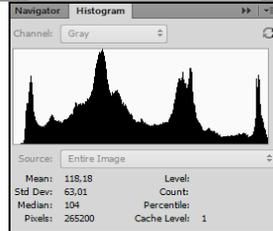
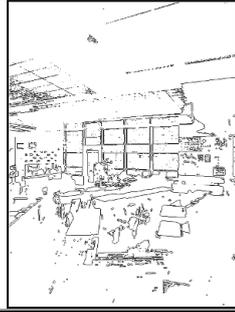
<p>Image 45</p> 	 <p>Source: Entire Image</p> <table border="1"> <tr> <td>Mean: 106,96</td> <td>Level: 82</td> </tr> <tr> <td>Std Dev: 59,88</td> <td>Count: 1333</td> </tr> <tr> <td>Median: 97</td> <td>Percentile: 38,68</td> </tr> <tr> <td>Pixels: 163500</td> <td>Cache Level: 1</td> </tr> </table>	Mean: 106,96	Level: 82	Std Dev: 59,88	Count: 1333	Median: 97	Percentile: 38,68	Pixels: 163500	Cache Level: 1	<p>Mean : 41.94% Std : 23.48%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de fort contraste (voir Graphe 5).</p>
Mean: 106,96	Level: 82									
Std Dev: 59,88	Count: 1333									
Median: 97	Percentile: 38,68									
Pixels: 163500	Cache Level: 1									
<p>Image 46</p> 	  <p>Source: Entire Image</p> <table border="1"> <tr> <td>Mean: 122,03</td> <td>Level:</td> </tr> <tr> <td>Std Dev: 59,72</td> <td>Count: 1333</td> </tr> <tr> <td>Median: 120</td> <td>Percentile:</td> </tr> <tr> <td>Pixels: 150000</td> <td>Cache Level: 2</td> </tr> </table>	Mean: 122,03	Level:	Std Dev: 59,72	Count: 1333	Median: 120	Percentile:	Pixels: 150000	Cache Level: 2	<p>Mean : 47.85% Std : 23.41%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de fort contraste (voir Graphe 5).</p>
Mean: 122,03	Level:									
Std Dev: 59,72	Count: 1333									
Median: 120	Percentile:									
Pixels: 150000	Cache Level: 2									
<p>Image 47</p> 	  <p>Source: Entire Image</p> <table border="1"> <tr> <td>Mean: 99,09</td> <td>Level:</td> </tr> <tr> <td>Std Dev: 60,90</td> <td>Count: 1333</td> </tr> <tr> <td>Median: 80</td> <td>Percentile:</td> </tr> <tr> <td>Pixels: 106400</td> <td>Cache Level: 2</td> </tr> </table>	Mean: 99,09	Level:	Std Dev: 60,90	Count: 1333	Median: 80	Percentile:	Pixels: 106400	Cache Level: 2	<p>Mean : 38.58% Std : 23.88%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace Moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de fort contraste (voir Graphe 5).</p>
Mean: 99,09	Level:									
Std Dev: 60,90	Count: 1333									
Median: 80	Percentile:									
Pixels: 106400	Cache Level: 2									
<p>Image 48</p> 	  <p>Source: Entire Image</p> <table border="1"> <tr> <td>Mean: 123,57</td> <td>Level:</td> </tr> <tr> <td>Std Dev: 77,98</td> <td>Count: 1333</td> </tr> <tr> <td>Median: 117</td> <td>Percentile:</td> </tr> <tr> <td>Pixels: 235733</td> <td>Cache Level: 1</td> </tr> </table>	Mean: 123,57	Level:	Std Dev: 77,98	Count: 1333	Median: 117	Percentile:	Pixels: 235733	Cache Level: 1	<p>Mean : 48.45% Std : 30.58%</p> <p>L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de fort contraste (voir Graphe 5).</p>
Mean: 123,57	Level:									
Std Dev: 77,98	Count: 1333									
Median: 117	Percentile:									
Pixels: 235733	Cache Level: 1									

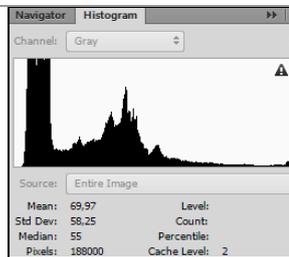
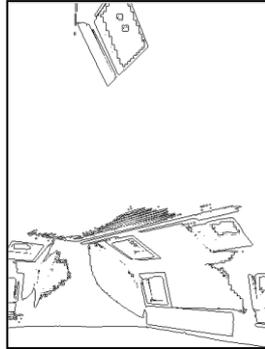
Image 49



Mean : 46.34%
Std : 24.7%

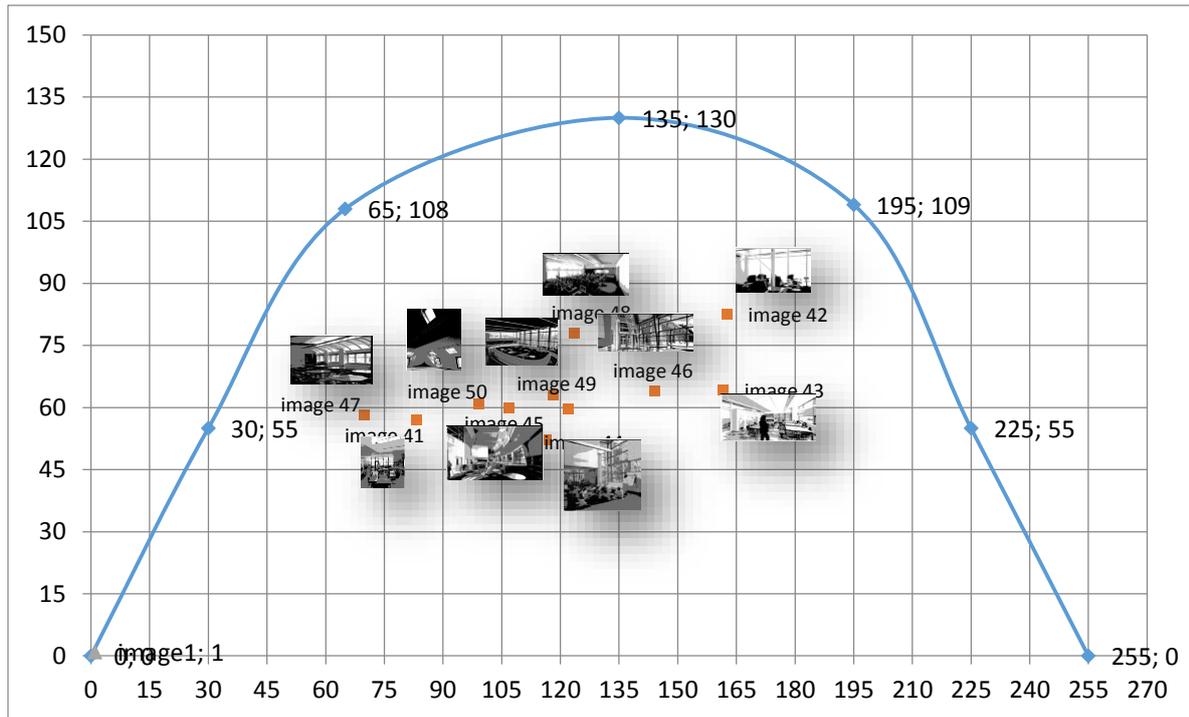
L'histogramme signale un niveau de brillance moyen pour l'image car la majorité des pixels est localisée au centre. Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de fort contraste (voir Graphe 5).

Image 50



Mean : 27.43%
Std : 22.84%

la majorité des pixels est localisée à l'extrémité gauche de l'histogramme (la zone d'ambiance sombre). Espace moyennement sombre. Image se trouve dans la zone de fort contraste (voir Graphe 5)



Graph 6 : Classification des ambiances lumineuses d'une image par la relation entre la brillance (moyenne) et le contraste (écart type) (source : auteur)

Il semble que la diversité des ambiances lumineuses se situe du côté des niveaux de brillance, l'ensemble des photographies montrant plutôt un degré de contraste moyen.

L'analyse quantitative (Graph 5) montre des niveaux de brillance allant de 38 % (très sombre) à 63% (très claire) et des degrés de contraste est moyen observé sur la majorité des photographies, s'échelonnant de 60.90 (contrasté) à 82.52 (très contrasté).

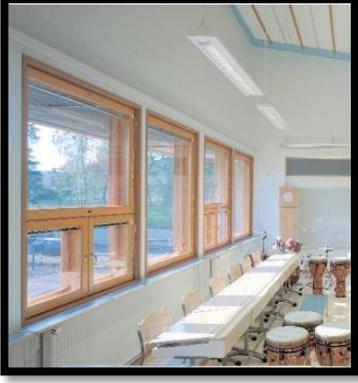
Annexe 03 : les tableaux d'indexation

Projet	<u>1.Salmtal Secondary School Canteen</u>  	<u>2.Canning Vale College</u>  
Source de l'image,	http://www.dezeen.com	http://edfacilitiesinvestment-db.org
Nom architecte ou groupes architectes	SpreierTrenner Architekten	HASSELL
Année de réalisation	2012	2004
Situation géographique	Allemagne	Perth, Australia
Dispositifs lumineux	Plusieurs fentes horizontales	Baies vitrées, éclairage latérale haut
Surface intérieures	Plancher brillant, murs clairs	Plancher sombre plancher brillant
Quantité de lumière	lumineux (faible contrasté)	sombre (faible contrasté)
Effets de lumière	Lumière rasante	Lumière uniforme

Projet	<u>3.School of Rudrapur</u>   	<u>4.Pavillon des arts visuels et du design</u>  
Source de l'image	https://lh3.googleusercontent.com	http://projetsverts.voirvert.ca
Nom architecte ou groupes architectes	Anna Heringer	Patrice Beauchemin et Éliisa Bell-Nadeau
Année de réalisation	2006	2010
Situation géographique	Bangladesh	Canada
Dispositifs lumineux	Porte fenêtre	Eclairage global transparent
Surface intérieures	Plancher sombre, murs sombre	Plancher sombre
Quantité de lumière	Très Sombre (contrasté)	Espace lumineux (fort contraste)
Effets de lumière	Lumière contrasté, contours diffus	Lumière contrastée, fond de pièce

Projet	<u>5.La Leroteca</u> 	<u>6.College Oreastad</u> 
Source de l'image,	http://surfingbird.ru	http://www.archweek.com
Nom architecte ou groupes architectes	<u>Lacaja Arquitectos</u>	3XN Architects Kim Herforth Nielsen, Bo Boje Larsen, Kim Christiansen
Année de réalisation	2013	2006
Situation géographique	Cundinamarca, <u>Colombia</u>	Copenhagen, Denmark
Dispositifs lumineux	Ouverture sur tout le mur, Eclairage sur tout le mur	Éclairage global transparent Protection opaque fixe
Surface intérieures	Plancher clair,	Plancher blanc Plafond blanc Murs blancs
Quantité de lumière	Sombre (faible contraste)	Lumineux (fort contraste)
Effets de lumière	Lumière uniforme	la lumière contrastée, taches solaires, contours nets

Projet	<p><u>7.School of The Hague</u></p>  	<p><u>8.råå day care center</u></p>  
Source de l'image,	http://www.kraaijvanger.nl	https://fr.pinterest.com
Nom architecte ou groupes architectes	Hans Goverde, Annemiek Bleumink, Laurence Meulman, Patrick Keijzer en Nol van den Boer	Morte Mandrup Mrkitekter
Année de réalisation	2010	2014
Situation géographique	Wassenaar, Finlande	<u>Helsinki FINLANDE</u>
Dispositifs lumineux	Ouverture zénithale, ouverture sur tout le mur	Ouverture zénithale, ouverture sur tout le mur
Surface intérieures	Plancher clair murs clair	Plancher clair murs clair
Quantité de lumière	Lumineux (faible contraste)	Très lumineux (faible contraste)
Effets de lumière	Lumière uniforme	Lumière englobante

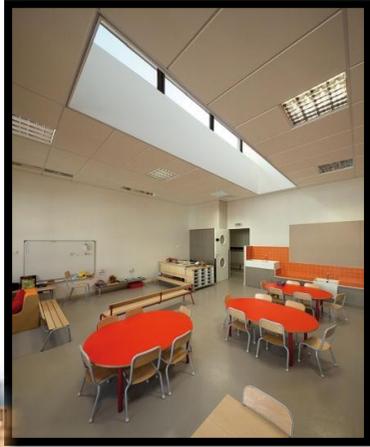
Projet	<u>9.Hosmarinpuisto School and Day Care Centre</u>  	<u>10.Lycée hôtelier Georges Frêche</u>  
Source de l'image,	https://www.oecd.org/edu/innovation-education/centreforeffectivelearningenvironmentscele/36931195.pdf	http://projets-architecte-urbanisme.fr
Nom architecte ou groupes architectes	Yrjö Suonto	Massimiliano Fuksas
Année de réalisation	2005	2012
Situation géographique	Espoo, Finland	Montpellier, France
Dispositifs lumineux	Eclairage latérale, Bandeaux lumineux	Eclairage latérale ; baie vitrée de forme irrégulière
Surface intérieures	Murs clairs	Espace de couleurs monochromes et homogènes
Quantité de lumière	Lumineux (faible contraste)	Lumineux (contrasté)
Effets de lumière	Lumière uniforme	La lumière contrasté, taches solaires, contours nets

Projet	11. <u>Lycée Georges Frêche</u>	12. <u>Lycée Georges Frêche</u>
Source de l'image,	http://static.dezeen.com	https://lh3.googleusercontent.com
Nom architecte ou groupes architectes	<u>Massimiliano and Doriana Fuksas</u>	Massimiliano Fuksas
Année de réalisation	2012	2012
Situation géographique	Montpellier, France	Montpellier, France
Dispositifs lumineux	Eclairage latérale ;	Eclairage latérale ;
Surface intérieures	Espace de couleurs monochromes et homogènes	Espace de couleurs monochromes et homogènes
Quantité de lumière	Sombre (faible contraste)	Lumineux (contrasté)
Effets de lumière	Lumière rasante	La lumière contrasté, taches solaires, contours nets

Projet	<u>13. GROUPE SCOLAIRE HENRI WALLON</u>	<u>14. GROUPE SCOLAIRE HENRI WALLON</u>
	 	
Source de l'image,	http://portalthomasteissier.com	http://portalthomasteissier.com
Nom architecte ou groupes architectes	Thomas Teissier	Thomas Teissier
Année de réalisation	2012	2012
Situation géographique	Nîmes, France	Nîmes, France
Dispositifs lumineux	Éclairage latérale, bandeau lumineux, éclairage latérale haut	Éclairage latérale, plusieurs fenêtres
Surface intérieures	Plafond blanc, murs blancs	Plancher brillant, plancher sombre
Quantité de lumière	Sombre (contrasté)	Très sombre (faible contraste)
Effets de lumière	Lumière contrasté, taches solaires, contours nets	Lumière colorée par réflexion

Projet	<u>15 Ecole maternelle du centre</u>	<u>16 Lycée professionnel, Albert Camus,</u>
		
Source de l'image,	http://s3.amazonaws.com	http://www.fosterandpartners.com
Nom architecte ou groupes architectes	Paul le Querenc Architect	Foster & partners
Année de réalisation	2006	1991
Situation géographique	France	Fréjus.
Dispositifs lumineux	Eclairage zénithale,	Eclairage second jour zénithal
Surface intérieures	Murs mats	Espace tout blanc
Quantité de lumière	Lumineux (fort contraste)	Moyenne sombre (contraste)
Effets de lumière	Lumière contrastée, clairière	

Projet	<u>17 l'école Saint-Jean</u>	<u>18 l'école d'Unité d'habitation</u>
		
Source de l'image,	http://images.adsttc.com	http://louisegoingout.fr
Nom architecte ou groupes architectes	<u>Dominique Coulon & associés</u>	Le Corbusier
Année de réalisation	2013	1967
Situation géographique	Strasbourg, France	Marseille France
Dispositifs lumineux	Fenêtre latérale, plusieurs fentes zénithales	fente zénithale
Surface intérieures	Plancher brillant	Plancher brillant
Quantité de lumière	Moyennement sombre (faible contraste)	Moyennement sombre (contrasté)
Effets de lumière	Lumière colorée (par réflexion)	Lumière contrasté, taches solaires, contours nets

Projet	<u>19 Ecole maternelle et ateliers Municipaux1</u>	<u>20 Sarreguemines Nursery</u>
	 	 
Source de l'image,	http://a5.images.divisare.com	http://images.adsttc.com
Nom architecte ou groupes architectes	Jean François Schimt	Michel Grasso + Paul Le Quer nec
Année de réalisation	2010	2011
Situation géographique	PARIS, FRANCE	Sarreguemines, France
Dispositifs lumineux	Verrière zénithale	Eclairage zénithale, coupole
Surface intérieures	Plancher sombre, murs blanc	Espace de couleurs monochromes et homogènes
Quantité de lumière	Moyennement sombre (faible contraste)	Moyennement sombre (faible contraste)
Effets de lumière	Lumière uniforme	Lumière contrastée, clairière

Projet	<u>21 Saint-Jean's Schools</u>	<u>22 Bailly School Complexe</u>
		
Source de l'image,	https://s-media-cache-ak0.pinimg.com	http://static.dezeen.com
Nom architecte ou groupes architectes	Dominique Coulon & Associés	<u>Mikou Design Studio</u>
Année de réalisation	2013	2009
Situation géographique	Strasbourg, France	Saint-Denis, France
Dispositifs lumineux	Coupole	Baie vitré, éclairage latérale haut
Surface intérieures	Espace de couleurs monochromes et homogènes	Murs clairs
Quantité de lumière	lumineux (faible contraste)	Lumineux (fort contraste)
Effets de lumière	Englobante	Ambiance inondée

Projet	<u>23 Collège de l'Esplanade</u>	<u>24 Groupe scolaire Joséphine-Baker24</u>
Source de l'image,	http://architectes.ch/fr	http://coulon-architecte.fr
Nom architecte ou groupes architectes	Pascal de Benoit & Martin Wagner	Dominique Coulon & associés
Année de réalisation	2003	2010
Situation géographique	, France	France
Dispositifs lumineux	Bandeaux lumineux	Baies vitrées, éclairage latérale haut
Surface intérieures	Espace de couleurs kontras	Plancher sombre
Quantité de lumière	Sombre (contrasté)	Lumineux (contrasté)
Effets de lumière	Lumière contrasté	Lumière contrasté, contours diffus

Projet	<u>25 Grenn School</u>	<u>26 Green School</u>
Source de l'image,	https://lh3.googleusercontent.com	http://territorias.com/
Nom architecte ou groupes architectes	US Green Building Council	US Green Building Council
Année de réalisation	2008	2008
Situation géographique	Indonisia	Bali, Andanosie
Dispositifs lumineux	Eclairage latérale,	Eclairage latérale,
Surface intérieures	Plancher sombre	Plancher sombre
Quantité de lumière	Moyenne sombre (fort contraste)	Moyenne sombre (contrasté)
Effets de lumière	Lumière contrasté	Lumière contrasté



Projet	<u>27 projet Green School</u>	<u>28 projet Green School</u>
Source de l'image,	https://lh3.googleusercontent.com/	https://lh3.googleusercontent.com
Nom architecte ou groupes architectes	<u>US Green Building Council</u>	<u>US Green Building Council</u>
Année de réalisation	2008	2008
Situation géographique	Bali, Andanosie	Bali, Andanosie
Dispositifs lumineux	Fente zénithale, éclairage latérale, coupole	Coupole
Surface intérieures	Plafond claire	Plancher sombre
Quantité de lumière	Lumineux (contrasté)	Lumineux (fort contraste)
Effets de lumière	Inondée	Inondée



Projet	<u>29 Loreto Community School</u>	<u>30 Lycée français jean mermoz</u>
	 	 
Source de l'image,	http://www.graftonarchitects.ie	http://www.pctidakar.org
Nom architecte ou groupes architectes	P.H.McCarthy	Atelier « Efficacité énergétique des bâtiments en zone tropicale
Année de réalisation	2006	2006
Situation géographique	Milford, Co. Donegal, Ireland	Dakar, Sénégal
Dispositifs lumineux	Eclairage latérale haut, baie vitrée	Second jour zénithale, second jour latéral
Surface intérieures	Plafond sombre	Plafond clair
Quantité de lumière	Moyenne sombre (fort contraste)	Moyenne sombre (contrasté)
Effets de lumière	Lumière contrasté, contours nets	Lumière englobante

Projet	31 Lycée français jean mermoz	32 Fawood Children's Centre
		
Source de l'image,	http://www.pctidakar.org/	http://c8.alamy.com/
Nom architecte ou groupes architectes	Atelier « Efficacité énergétique des bâtiments en zone tropicale	Alan Lai, Alsop Design Ltd
Année de réalisation	2006	2004
Situation géographique	Dakar, Sénégal	United Kingdom London
Dispositifs lumineux	Eclairage latérale, ouverture sur tout le mur	Eclairage latérale, ouverture sur tout le mur
Surface intérieures	Plafond clair mur clair,	Plancher sombre
Quantité de lumière	Lumineux (fort contraste)	Moyenne sombre (fort contraste)
Effets de lumière	Ambiance inondée	Lumière contrastée, contours diffus

Projet	33 Michael Faraday Community School33	34 James' School
Source de l'image,	http://openbuildings.com	http://www.dezeen.com
Nom architecte ou groupes architectes	Alsop Sparch	London firm Squire and Partners
Année de réalisation	2010	
Situation géographique	United Kingdom London	Ashford United Kingdom London
Dispositifs lumineux	Plusieurs fentes zénithales	Verrière zénithale
Surface intérieures	Espace de couleurs contrastées	
Quantité de lumière	Moyenne sombre (fort contraste)	Moyenne sombre (fort contraste)
Effets de lumière	Lumière contrastée	Lumière contrasté, contours nets

33 Michael Faraday Community School33



34 James' School



Projet	<u>35 Kingsmead Primary School</u> 	<u>36 The East Harlem School</u> 
Source de l'image,	http://webarchive.nationalarchives.gov	http://images.adsttc.com
Nom architecte ou groupes architectes	Craig White, White Design Associates Ltd.	GLUCK+
Année de réalisation	2004	2008
Situation géographique	United Kingdom London	New York, USA
Dispositifs lumineux	Plusieurs fentes zénithales	Bandeaux lumineux
Surface intérieures	Plafond sombre	Espace tout blanc
Quantité de lumière	Moyenne sombre (faible contraste)	Moyenne sombre (contrasté)
Effets de lumière	Lumière uniforme	Lumière contrastée, taches solaires, contours diffus

Projet	<u>37 The East Harlem School</u>	<u>38 Portland Community College Newberg Center</u>
Source de l'image,	https://lh3.googleusercontent.com	http://www.aiatopten.org
Nom architecte ou groupes architectes	Gluck +	Hennebery Eddy Architects
Année de réalisation	2008	2012
Situation géographique	New York. USA	Portland USA
Dispositifs lumineux	Bandeaux lumineux	Baies vitrées, fentes zénithales
Surface intérieures	Murs clairs	Murs clairs
Quantité de lumière	Lumineux (faible contraste)	Moyenne sombre (faible contraste)
Effets de lumière	Lumière rasante	Lumière uniforme

Projet	<u>39 Haywood Community College Creative Arts Building</u>  	<u>40 Chemeketa Community College</u> 
Source de l'image,	http://www.hpbmagazine.org	http://www.srgpartnership.com
Nom architecte ou groupes architectes	Clyde, N.C.	Sam Stadler, AIA
Année de réalisation	2013	2013
Situation géographique	USA	USA
Dispositifs lumineux	Eclairage latérale haut	Fenêtre, ouverture multi ponctuelles
Surface intérieures	Espace tout blanc, Plancher brillant	Espace tout blanc, Plancher brillant
Quantité de lumière	Lumineux (fort contraste)	Lumineux (fort contraste)
Effets de lumière	Lumière inondée	Lumière inondée

Projet	<u>41 Students Union, University of Warwick</u>	<u>42 City Learning Centre, Bristol</u>
	 	 
Source de l'image,	https://www.pinterest.com	Derek Philips (2004)
Nom architecte ou groupes architectes	Architect Casson Conder	Architect Alec French Partnership
Année de réalisation		2001
Situation géographique	USA	USA
Dispositifs lumineux	Ouverture sur tout le mur	Ouverture sur tout le mur
Surface intérieures	Plafond sombre	Plancher sombre
Quantité de lumière	moyennement sombre (contrasté)	Lumineux (fort contraste)
Effets de lumière	Lumière contrastée	Lumière contrastée

Projet	<u>43 the Kathleen Grimm School</u>	<u>44 Ben Franklin Elementary School,</u>
		
Source de l'image,	http://www.dezeen.com	http://www.oecd.org/edu/innovation-education/centreforeffectivelearningenvironmentscele/43834191.pdf
Nom architecte ou groupes architectes	SOM designs first net-zero energy	Mahlum Architects
Année de réalisation		2006
Situation géographique	New York, USA	Kirkland Washington, US
Dispositifs lumineux	Bandeaux lumineux	Baies vitrées
Surface intérieures	Espace tout blanc	Plancher sombre
Quantité de lumière	Lumineux (fort contraste)	moyennement sombre (faible contraste)
Effets de lumière	Inondée	Contrasté

Projet	<u>45 The Machias Elementary School's</u>	<u>46 The Machias Elementary School's</u>
Source de l'image,	http://cplinc.com	http://cplinc.com
Nom architecte ou groupes architectes	NAC Architecture.	NAC Architecture.
Année de réalisation	2012	2012
Situation géographique	Washington	Washington
Dispositifs lumineux	Plusieurs fentes zénithales, baie vitrées, éclairage latérale	Baie vitrées, éclairage latérale
Surface intérieures		
Quantité de lumière	Moyennement sombre (fort contraste)	Moyennement sombre (fort contraste)
Effets de lumière	Lumière contrasté, taches solaires, contours nets	Lumière contrasté, taches solaires, contours nets

Projet	<u>47 Andrew H.Wilson Elementary Elementary School</u>	<u>48 Andrew H.Wilson Elementary Elementary School</u>
		
Source de l'image,	http://www.sciencedaily.com	http://www.hmsarchitects.com/07-028/HMSWilsonLecture.pdf
Nom architecte ou groupes architectes	HMS Archites	HMS Archites
Année de réalisation	2008	2008
Situation géographique	New Orleans, USA	New Orleans, USA
Dispositifs lumineux	Eclairage latérale haut, bandeaux lumineux	Eclairage latérale haut, bandeaux lumineux
Surface intérieures		
Quantité de lumière	Moyennement sombre (fort contraste)	Moyennement sombre (fort contraste)
Effets de lumière	Lumière contrasté contours diffus	Lumière contrasté

Projet	49 Elementary Schools	50 Elementry school complex at Techum
	 	 
Source de l'image,	http://archinect.com	http://www.archdaily.com
Nom architecte ou groupes architectes	<u>Gelfand Partners Architects</u>	Yushi Uehara / Zerodegree Architecture
Année de réalisation		2009
Situation géographique	Los Altos, CA, US	Zuidland, <u>The Netherlands</u>
Dispositifs lumineux	Eclairage zénithale, éclairage latérale	Eclairage zénithale, éclairage latérale
Surface intérieures	Espace tout blanc	Murs blancs plafond sombre
Quantité de lumière	Moyennement Sombre (fort contraste)	Moyennement Sombre (fort contraste)
Effets de lumière	Lumière contrasté Fond de pièce	Lumière contrasté Fond de pièce

