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

Institut de Génie civil, hydraulique et Architecture

Département d'architecture

Mémoire :
En vue de l'obtention du diplôme de magistère en architecture
Option : la conception architecturale

Réalisé par : Ahmed Motie DAICHE **Encadré par : Pr. Saïd MAZOUZ**

Titre :

Vers un outil d'aide à l'optimisation de l'éclairage naturel dans le processus de conception architecturale -Approche inverse-

MEMBRE DE JURY	GRADE	AFFILIATION	STATUT
Pr. ARROUF Abdelmalek	Professeur	Université de Batna	Président
Dr. AMRI Brahim	M.C.A	Université de Batna	Examinateur
Dr. BELAKEHAL Azeddine	M.C.A	Université de Biskra	Examinateur
Dr. AMRANE Salima	M.C.B	Université de Batna	Examinateur
Pr. MAZOUZ Saïd	Professeur	Université d'Oum El-Bouaghi	Encadreur

Année universitaire 2014/2015

Vers un outil d'aide à l'optimisation de l'éclairage naturel dans le processus de conception architecturale -Approche inverse-

Ahmed Motie DAICHE

Remerciement

À l'issue de ce projet, qui est tout autant un cheminement personnel qu'une construction collaborative, je tiens particulièrement à remercier mon encadreur Pr. MAZOUZ Said pour son enseignements sur le métier de chercheur ; les enseignants : Pr. MOUMI Abdelhafide, Dr. BADA Yacine, et Mr. NANI Youcef pour leurs conseils si avisés ainsi que les membres du jury Pr. ARROUF Abdelmalek, Dr. BELAKHAL Azzedine, Dr. AMRI Brahim et Dr. AMRANE Salima qui participent à la finalisation de ce travail.

Je termine par un grand remerciement pour mes chers parents, ma sœur, mon beau-frère, notre petite Sarah, mes amis et toutes les personnes qui m'aiment auxquels je dédie ce mémoire.

Résumé

Parmi les diverses entités que doit manipuler tout concepteur au cours de son travail de conception d'un nouveau projet d'architecture, vient le confort et précisément le confort visuel avec les différentes ambiances lumineuses créées, souvent négligé au profit du côté morphique et traité en aval par rapport aux étapes de conception. L'évolution du domaine de la simulation numérique de l'éclairage intérieur s'est accompagnée d'une augmentation du nombre des logiciels scientifiques et commerciaux permettant de faire une simulation imaginaire des bâtiments mais, dans la plupart des cas, les résultats en termes de niveau d'éclairement ne correspondent pas à la réalité.

La finalité de ce travail de recherche est de développer un modèle numérique de simulation inverse de l'éclairage naturel permettant l'expression, par le concepteur, de ses intentions d'ambiance lumineuse dès les prémisses de la conception. Le développement de ce modèle est donc focalisé sur le calcul des apports lumineux extérieurs venant d'un élément de ciel situé dans la voute céleste. A la base de ces données, un deuxième calcul numérique est ensuite réalisé afin de dégager un dimensionnement d'un élément d'ouverture (fenêtre ou autres) permettant la concrétisation d'une intention d'ambiance lumineuse à son niveau quantitatif. Le modèle est validé de manière théorique par des tests de simulation directe et de manière pratique par une application dans une situation réelle de conception auprès des concepteurs (étudiants d'architecture). Les résultats de comparaison donneront une idée sur les possibilités d'intégration de cette méthode dans le travail de conception des projets d'architecture.

Notre travail est divisé en deux parties, une première englobant toutes les notions de base sur la lumière naturelle, sur le domaine de la C.A.O, sur l'approche inverse en éclairage naturel ainsi que sur l'état de l'art des logiciels de simulation de la lumière naturelle ; elle regroupe les chapitre I et II. La deuxième partie de ce travail est celle qui apporte du nouveau dans cette recherche, elle représente notre modèle numérique développé et appliqué dans une situation réelle de conception architecturale ; elle regroupe les chapitre III et IV.

Les mots clés : La lumière naturelle, L'approche inverse, CAO, Modèle numérique, Simulation informatique, Validation expérimentale.

Abstract

Among the various entities that any designer must handle when designing a new project, comes comfort and in more precise terms visual comfort, often overlooked in favor of morphic appearance and always treated downstream design steps. The evolution of the field of numerical simulation of interior lighting has been accompanied by an increasing number of scientific and commercial software to make an imaginary simulation of buildings but in most cases, the result in terms of level lighting is not suitable to reality.

The objective of this work is to develop a numerical model of inverse simulation of natural lighting allowing the expression, by the designer, of his luminous atmosphere intentions right from the start of the design. The development of this model is focused on the calculation of the external light input from a sky element in the celestial sphere. On the basis of these data, a second numerical computation is then performed to achieve a design of an opening element for the realization of an intention to bright atmosphere. The model is validated theoretically by direct simulation tests and practical way by an application in a real design from designers. Comparing the results give an idea about the possibilities of integrating this method in the architectural design work.

Keywords: Natural light, the reverse approach, CAD, Numerical model, computer simulation, experimental validation.

ملخص

من بين العديد من العناصر التي يتوجب على كل مصمم معماري مراعاتهاعند الشروع في عمله التصميمي هناك عنصر الرفاهية وخاصة الرفاهية البصرة. هذه الأخيرة، وبالرغم من أهميتها، تلقى في أغلب الأحيان تجاهلا من طرف المصممين الذين يولون اهتماما أكثر للجانب الشكلي خلال الخطوات الأولى من التصميم.

الهدف من هاذا البحث هو الوصول إلى تطوير نموذج عددي مبني على أساس المحاكاة العكسية للضوء الطبيعي و ذالك من أجل السماح للمصمم بطرح وتجسيد نواياه في ما يخص نظام التشميس إنطلاقا من المراحل الأولى للتصميم. تطوير هاذا النوذج تركز في بداية الأمر على حساب كمية الضوء المتواجدة في المحيط الخارجي والقادمة من عنصر معين في السماء. إنطلاقا من من هاذا، تم إجراء سلسلة حسابات ثانية هدفها معرفة الأبعاد اللازم إعطائها للنوافذ أو الفتحات بشكل عام من أجل الحصول على كمية الإظاءة المبتغاة.

التحقق من صحة النتائج المحصل بعد تطوير النموذج كان بشكل نظري عبر برامج محاكاة مباشرة للإضاءة الطبيعية وبشكل تطبيقي باستعمال النموذج في تجربة تم القيام بها بالإستعانة بطلبة الهندسة المعمارية. المقارنة بين مختلف النتائج تسمح بعد ذالك بتكوين فكرة حول إمكانية إدماج وإستعمال النموذج المطور ضمن قائمة الوسائل الممكن الإستعانة بها خلال المراحل الأولى من التصميم المعماري مخاصة تصميم نظام الإضاءة الطبيعية داخل المجال امعماري.

كلمات البحث: الضوء الطبيعي، التصميم بمساعدة الحاسوب، المحاكاة العكسية، النموذج العددي، التحقق التجريبي.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

Introduction ……..……....……I

Problématique …..…….…….……..…..…….....II

Hypothèses …..…….…….……VI

Objectifs…….…...…..VI

Méthodologie……...…….V

CHAPITRE I : ***La notion de l'éclairage naturel dans la conception architecturale……1***

Introduction ……2

I. La conception comme processus de "Résolution de Problèmes" ……3

I. 1. Le processus de conception chez les Anglo-saxons…….3

I. 1.1. La contribution de John Christopher Jones ……..…….3

I.1.2. La contribution de Christopher Alexandre …….……4

I.1.3. La contribution d'Herbert Simon……..…..4

I.1.4. La contribution de Geoffrey Broadbent……..……5

I.1.5. La contribution de Horst Rittel……..6

I.1.6. La contribution de Karl Popper……..……6

I.1.7. La contribution de Nigel Cross ……...…..7

I.2. Le processus de conception chez les Français…….....8

I.2.1. La contribution de Jean-Charles Lebahar…….…….. 8

I.2.2. La contribution de Philippe Boudon…….…….……9

I.2.3. La contribution de Dominique Raynaud……..……...10

I.2.4. La contribution de Robert Prost…….…….……11

I.3. Récapitulation……..……12

I.3.1. Tableau récapitulatif…….…...13

I.3.2. Caractéristiques des problèmes de conception…….……...……14

I.3.3. Modèle du projet architectural proposé par Daniel Siret……..…..…14

II. L'ambiance lumineuse comme l'un des problèmes de conception architecturale….16

II.1. Définitions…….……16

II.2. Exemples de prise en compte de l'éclairage naturel dans la conception des projets architecturaux……..…17

II.2.1. L'exemple du "Dôme du Palais du Reichstag" par Norman Foster ……18

II.2.2. L'exemple de "De Syllas House" par Justin De Syllas ……..…19

II.2.3. L'exemple de "Orchard Learning and Resource Centre" par Ahrends Burton, Koralek et Ove Arup and Partners……..20

II.2.4. L'exemple de la "American Community School, Sports Centre" par les architectes du Studio E Architects……..…..…21

II.2.5. L'exemple de "Gridshell Building, Weald and Downland Museum" par Edward Cullinan et Buro Happold…….…..…..…22

II.3. Récapitulation…….....23

III. La lumière naturelle comme support physique de l'éclairage naturel……24

III.1. Un bref aperçu …….24

III.2. Introduire la lumière de jour au bâtiment…….……24

III.3. Caractérisation de l'environnement lumineux extérieur ……25

III.3.1. Modèle de ciel de Moon & Spencer…….……26

III.3.2. Modèle de ciel de Richard Kittler ……26

III.3.3. Modèles de ciel de Nakamura et Igawa……..……27

III.3.4. Modèle de ciel de Michel Perraudeau ……27

III.3.5. Modèle de ciel de Richard Pérez …….……27

IV.4. Evaluation de la lumière de jour ……...28

IV.4.1. Unité d'évaluation quantitative……28

IV.4.2. Evaluation qualitative ……..…30

Conclusion……32

CHAPITRE II : ***Simulation classique et simulation inverse de l'ensoleillement dans le projet architectural……...33***

Introduction ……..…34

I. Etat de l'art de la simulation directe de l'ensoleillement ……..….35

I.1. Conception Assistée par Ordinateur ……..…35

I.1.1. Logiciel informatique ……..……35

I.1.2. Simulation numérique …….35

I.1.3. Logiciels de simulation directe de l'ensoleillement ……36

I.2. Validation d'un Logiciel de Simulation de l'Eclairage ……37

I.2.1. Validation analytique ……38

I.2.2. Validation expérimentale ……38

I.2.3. Validation comparative ……38

I.3. Exemple de Logiciels de Simulation d'Eclairage Naturel ……39

I.3.1. ADELINE ……39

I.3.2. DIALux ……39

I.3.3. ECOTECT ……39

I.3.4. GENELUX ……40

I.3.5. INSPIRER ……40

I.3.6. LesoDial / DIAL-Europe ……41

I.3.7. LIGHTSCAPE ……41

I.3.8. RADIANCE ……42

I.3.9. SUPERLITE ……42

I.3.10. VELUX DAYLIGHT VISUALIZER ……42

I.3.11. Synthèse comparative des logiciels de simulations directe de l'ensoleillement ……43

I.4. Exemple de travail avec les logiciels de simulation de l'éclairage naturel……..44

I.4.1. Présentation du modèle d'espace pour la simulation directe ……44

I.4.2. Les étapes du travail avec DIALux 4.11.0.2 ……45

I.4.3. Les étapes du travail avec "ECOTECT V 5.50" ……45

I.4.4. Comparaison entre DIALux 4.11.0.2 et ECOTECT V 5.50 ……46

I.4.5. Proposition d'un diagramme de simulation de l'éclairage ……47

II. L'approche inverse comme solution au problème de conception d'éclairage ……48

II.1. Modélisation déclarative ……48

II.1.1. Présentation ……48

II.1.2. Avantages de la modélisation déclarative ……49

II.1.3. Etapes de la modélisation déclarative ……50

II.2. L'Approche inverse en éclairage naturel ……51

II.2.1. Présentation ……51

II.2.2. Niveaux de simulation inverse de l'ensoleillement ……52

II.2.3. Méthodes de simulation inverse de l'ensoleillement ……..…….53

II.2.4. Expressions des intentions……..…55

III.3. Exemple de programmes informatiques de simulation inverse de l'ensoleillement …….....58

II.3.1. Le logiciel TRNSHD…….58

II.3.2. Le logiciel WINSHADE…….....59

II.3.3. Le logiciel SUSTARC ……..….59

II.3.4. Le logiciel CALCSOLAR ……..……..59

Conclusion……..……61

CHAPITRE III : ***Vers un modèle numérique de calcul des ouvertures par simulation inverse de l'ensoleillement……..……62***

Introduction ……..63

I. Présentation et argumentation du choix du modèle d'espace et des points de calcul..64

I.1. Présentation et argumentation du modèle d'espace choisi pour le calcul…….64

I.1.1. Géométrie et dimensions ……..……..64

I.1.2. Présentation et argumentation du choix des points de calcul ……..……65

I.2. Les étapes de calcul ……66

I.2.1. Etape (1) : calcul du flux extérieur Φext ……..….66

I.2.2. Etape (2) : Calcul des surfaces des éléments d'ouverture ……..……..70

I .3. Validation des résultats du calcul …….....76

I.3.1. Résultats du calcul avec DIALux 4.11 ……...…...77

I.3.2. Résultats du calcul avec Ecotect Analysis 2011 ……..……78

I.3.3. Remarque et interprétation des résultats de la validation ……...…….79

I.3.4. Evaluation statistique des écarts des résultats ……..……80

I.4. Le modèle développé MSNIEN ……..82

I.4.1. Présentation ……82

I.4.2. Utilisation de MNSIEN …….…...…83

Conclusion…….……...…84

CHAPITRE IV : *Application du modèle dans une situation réelle de conception des ouvertures ….……..….85*

Introduction ……..86

I. Présentation de l'expérience ……..…….87

I.1. Environnement de l'expérience ……..……87

I.1.1. Lieu de l'expérience ……87

I.1.2. Date et heure de l'expérience ……..……87

I.1.3. Outils utilisés durant l'expérience ……..87

I.1.4. Sujets de l'expérience ……..87

I.2. Déroulement de l'expérience ……...…89

I.2.1. Phase « cours » …….....89

I.2.2. Phase « exercice » ……...89

II. Résultats de l'expérience ……..….90

II.1. Résultats du groupe A (utilisant DIALux 4.11.02) ……....90

II.2. Résultats du groupe B (utilisant MNSIEN) ……93

III. Etude des résultats de l'expérience ……94

III.1. Evaluation des résultats ……..94

III.1.1. Evaluation des résultats du Groupe A ……94

III.1.2. Evaluation des résultats du Groupe B ……97

III.1.3. Synthèse de l'évaluation des résultats ……99

III.2. Rapprochement des résultats ……....103

III.2.1. Paramètre « dimensions » de l'élément d'ouverture ……..…103

III.2.2. Paramètre « surface » de l'élément d'ouverture ……105

IV. Tableau de comparaison montrant l'avantage de MNSIEN par rapport à DIALux ……..…..108

Conclusion……109

***Conclusion générale et Perspectives*……..…..110**

***Annexe*……..…...115**

***Liste des figures*……...……..…..144**

***Liste des tableaux*…….....…149**

***Bibliographie*……...……..…..151**

Nomenclature

K	Kelvin
W	Watt
m^2	mètre-carré
Sr	Stéradian
Cd	Candela
Lx	Lux
Lm	Lumen
Ll_m	Nanomètre
(I)	Intensité lumineuse (cd)
(F)	Flux lumineux (lm)
(E)	Eclairement (lx)
(M)	Émittance ($lm.m^{-2)}$
(L)	Luminance (cd/m^2)
S	Surface (m^2)
R	Rayon (m)
P	Point de calcul
C	Vitesse de la lumière (km/h)
Lz	Luminance zénithale (cd/m2)
Lγ	Luminance élément du ciel (cd/m^2)
Lγα	Luminance élément du ciel (cd/m^2)
Lp	Luminance au point P du ciel (cd/m^2)
Lv	Luminance relative (cd/m^2)
ϕ_e	Flux lumineux émis (lm)
ϕ_r	Flux lumineux transmis (lm)
E_C	Eclairement provenant du ciel (lx)
TV	Taux de variation
CM	Coefficient de multiplication
De	Eclairement énergétique diffus (W/m^2)
Dv	Eclairement diffus (W/m^2)
γs	Altitude ou hauteur du soleil (rad)
γ	Altitude ou hauteur élément de ciel (rad)
S_f	Surface nette de vitrage (m^2)
S_t	Surface totale (m^2)
ε	Coefficient de pureté du ciel
Δ	Coefficient de luminosité du ciel
a	Coefficient d'assombrissement ou d'éclaircissement
b	Coefficient de gradient de luminance
c	Coefficient d'intensité relative
d	Coefficient de largeur zone du circumsolaire
e	Coefficient de lumière rétrodiffusée relative
T_L	Facteur de transmission lumineuse du vitrage
F_R	Facteur de réflexion moyen
Φ	Fonction de gradation
f	Fonction indicatrice
τ	Coefficient de transmission
μ0	Constante
!0	Constante
!	Energie
h	Constante de Planck
"	Fréquence de l'onde
N	Nébulosité
π	Rapport de la circonférence
α_{sky}	Angle azimutal du ciel (rad)
α_{sun}	Angle azimutal du soleil (rad)
αs	Angle azimutal du soleil (rad)
α	Angle azimutal de l'élément de ciel(rad)
$\alpha_{1,2,3}$	Angle entre point à éclairer et la direction de la surface éclairée vers l'élément d'ouverture (rad)
ζ	Angle zénithal (rad)
γ	Angle entre élément ciel et horizon (rad)
A	Angle du ciel visible (%)
Zs	Angle zénithal du soleil (rad)
Z	Angle zénithal de l'élément de ciel (rad)
β	Angle entre la normale de l'élément d'ouverture et la direction de l'élément d'ouverture vers la facette source (rad)
ω	Angle solide (sr)
Ω	Angle solide (sr)
Ωe	Angle solide contenant le flux Φe.
X	Distance angulaire de l'élément de ciel depuis le soleil.
F (γ)	Eloignement par rapport au soleil
g (ζ)	Distance zénithale d'un point
h (Z)	Distance zénithale du soleil.
χ	Distance angulaire (rad)
$d_{1,2,3}$	Distance entre l'élément d'ouverture et la face qui porte le point à éclairer (m)
l	Distance entre l'élément d'ouverture et le centre de la surface éclairée (m)
Az	Différence d'azimut (rad)
θ	Altitude élément de ciel
h	altitude soleil
O_i	Opérateur
(m)	Modèle-source
m'	Modèle-but

Introduction générale.

"Le soleil ne se lève pas en vain tous les jours. La lumière, au contraire, avec ou sans théorie corpusculaire est quelque chose de concret, de précis, de certain. C'est une matière mesurable et quantifiable, comme le savent bien les physiciens mais semblent l'ignorer les architectes".

Alberto Campo BAEZA

INTRODUCTION GENERALE

Au cours de l'histoire, l'architecture a montré sa forte relation avec la lumière. Elle est indissociable d'elle. Sa présence ou son absence dans un espace architectural donne une lecture à cet espace. La lumière avec toutes ses caractéristiques en termes d'invisibilité, de sa dimension immatérielle, de son caractère changeant influencent fortement la physiologie et la psychologie de l'être humain qui réagit suivant les conditions lumineuses présentent dans un espace. [Francioli, 2001] La lumière naturelle constitue un des éléments dont la maitrise correcte conduit à mieux voir et à mieux faire l'architecture, c'est un élément clé dans la conception architecturale. La prise en compte de l'éclairage naturel dans cette phase joue un rôle important, conduisant à une amélioration qui concourt à la qualité architecturale, ce qui assure le bien-être de l'occupant (confort thermique, confort visuel ainsi que le confort psychologique). L'éclairage naturel peut constituer aussi un facteur déterminant dans une démarche de conception architecturale dans la mesure où il participe au processus de génération d'une certaine ambiance à l'intérieur de l'espace conçu. [Gallas, 2009]

Le travail de conception, avec référence particulière à l'éclairage naturel, a été et continue d'être la préoccupation de nombreux architectes depuis l'antiquité jusqu'à nos jours. [Polingeas, 2004] On trouve pourtant à toutes les époques et dans des sociétés aux modes de vie forts différents le témoignage d'une préoccupation manifeste des habitants ou des bâtisseurs vis-à-vis de leur environnement et plus particulièrement de l'ensoleillement ; elles nous sont parvenues soit par la présence de vestiges archéologiques, soit par la perpétuation d'une tradition constructive ou encore sous la forme d'écrits. Parmi ceux-ci, les plus célèbres sont sans aucun doute ceux de Vitruve, qui signale l'importance pour les Romains, de la distribution des pièces par rapport à la course solaire et leur répartition autour d'une cour, écrits abondamment relayés par les traités théoriques à partir de la Renaissance. [Miguet, 2002] Malgré l'existence d'autres écrits au fur et à mesure du développement de l'architecture, dans chaque période, les concepteurs disposaient d'outils qui les aidaient à concrétiser leurs intentions.

L’optimisation de l’éclairage naturel au cours de la conception architecturale permet de créer un espace architectural qui répond non seulement aux besoins quantitatifs mais aussi qualitatifs des occupants et réduit la consommation énergétique en termes d’électricité, ce qui participe à la préservation de l’environnement. La conception d’un système d’éclairage naturel optimal constitue une tâche complexe qui doit idéalement s’effectuer cas par cas, mais malheureusement, les variations quotidiennes et saisonnières de la lumière naturelle ainsi que le haut niveau de complexité qui caractérise son comportement sont parmi les aspects les plus invisibles et les plus fréquemment négligés du phénomène de conception d’une ambiance lumineuse, ce qui en diminue le rendement. Pour cette raison, des méthodes manuelles et graphiques ont été développées par l’intermédiaire de la physique de la propagation lumineuse et ont été mises au point pour répondre à ce besoin. De plus, et suite au développement de l’informatique et le recours à la conception assistée par ordinateur "CAO" la tâche est devenue un peu plus facile. Mais, cette dernière nécessite l’introduction de données précises qui ne sont généralement disponibles que lorsque le projet est déjà conçu, ce qui rend la tâche plus longue. Une méthode inverse de conception de l’éclairage naturel semble être une solution pour optimiser l’éclairage naturel au cours de conception architecturale.

PROBLEMATIQUE

La lumière naturelle est l’un des éléments les plus importants dans la conception d’un objet architectural. La valorisation de l’éclairage naturel dans les bâtiments répond à un double objectif : le premier est la recherche du confort visuel à travers une lumineuse basée sue la lumière du jour vu que cette dernière est la plus adaptée à la physiologie de l’homme ; le deuxième objectif est la recherche d’efficacité énergétique et de maîtrise de consommation d'énergie. Les stratégies de l'éclairage naturel peuvent contribuer à réduire la consommation énergétique dans les bâtiments ainsi que les émissions de gaz à effet de serre par la réduction des besoins de leur éclairage électrique et de refroidissement [Scartezzini, 1993] C’est pour cette raison que l’éclairage naturel d’un bâtiment doit prendre en compte des facteurs influençant l’orientation, la taille et l’emplacement des ouvertures, les caractéristiques du vitrage, l’effet psychologique de la lumière ...etc.

Parmi les moyens utilisés pour optimiser la lumière de jour dans un espace, il y a la conception assistée par ordinateur. Cette dernière, en faisant appel à un ensemble de techniques et à l’informatique, permet la description d’un objet à travers la fonction de

modélisation paramétrique, l'évaluation de cet objet grâce à la simulation numérique, le calcul des performances et les possibilités de visualisation, etc... Elle permet aussi d'affiner cet objet en le transformant, jusqu'à l'obtention d'une configuration jugée satisfaisante. [Gunéa, 1997]

Mais, malgré leurs apports indéniables, les outils appartenant à la CAO, comparés au processus de conception architecturale, présentent quelques lacunes. D'une part, ces outils informatiques ne semblent pas avoir une influence majeure sur la manière de concevoir le/les projet(s) d'architecture, car les étapes du processus de conception architecturale avant et après l'introduction de la CAO restent les mêmes. D'autre part, l'outil informatique est ainsi utilisé pour formaliser et produire des représentations numériques du travail de l'architecte avec plus ou moins de facilité dans la réalisation des différents documents graphiques (plans, coupes, élévations, perspectives, images de synthèse, etc…) cela en utilisant une interface graphique permettant de construire un modèle numérique du bâtiment. Cette restriction à la notion d'assistance à la conception est due, en grande partie, au fait que les outils de CAO nécessitent l'introduction de données précises qui ne sont généralement disponibles que lorsque le projet est déjà suffisamment élaboré ou parfois complètement achevé.

L'évolution du domaine de la simulation numérique de l'éclairage intérieur s'est accompagnée d'une augmentation du nombre des logiciels scientifiques et commerciaux proposés dans le marché de l'informatique et mis à la disposition du concepteur et ces derniers varient en termes de fonctions proposées et de techniques utilisées. Ces programmes permettent de faire une simulation imaginaire des bâtiments, en commençant par la définition de la géométrie, en faisant entrer les propriétés physiques des matériaux utilisés pour enfin pouvoir ensuite simuler la lumière naturelle intérieure qui rentre dans le local par une surface d'ouverture. Ces logiciels posent deux problèmes majeurs ; Les résultats, dans la plupart des cas, ne conviennent pas à la réalité car la majorité de ces logiciels ne contiennent pas une base de données climatique (La NASA ne couvre pas toutes la surface du globe terrestre) et nous sommes obligés de chercher le climat lumineux qui correspond à notre situation géographique. Le deuxième problème, dans le cas où on obtient des résultats d'éclairement intérieur non satisfaisants, c'est qu'il est nécessaire de revenir à la première phase de conception et intervenir au niveau de l'ouverture (élargir ou réduire la surface de la fenêtre) pour améliorer le confort visuel.

Donc, il est important de s'interroger sur la méthode / l'outil qui permet d'optimiser la lumière naturelle dans un espace architectural au cours des premières phases de conception,

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.

Alors, peut-on créer un outil qui détermine la surface d'ouverture nécessaire pour une quantité d'éclairement intérieur donnée? Quelle approche peut-on suivre pour atteindre cet objectif ? Quelles sont les données nécessaires pour arriver à un dimensionnement précis de l'ouverture? Et comment peut-on valider les résultats obtenus pour vérifier la fiabilité et la performance de cet outil dans le domaine de la conception en éclairage naturel?

LES HYPOTHESES

L'ensemble des questions posées dans la problématique nous a conduit, de manière assez logique à proposer un ensemble d'hypothèses avec pour but d'arriver à concevoir un outil d'aide à optimiser l'éclairage naturel au cours de la phase de la conception architecturale.

Les hypothèses dégagées sont les suivantes :

1. Le recours à l'approche inverse peut répondre aux intentions du concepteur en matière de quantité et de qualité de lumière voulues dans un espace architectural. 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.
2. Le même recours peut épargner au concepteur un tâtonnement inutile et l'aider ainsi à parvenir à une solution acceptable dès les phases initiales du projet architectural.

LES OBJECTIFS

L'objectif de ce travail est de contribuer à un changement positif dans l'état de fait mentionné ci-dessus, cela, en allant vers un développement d'un outil d'aide à l'optimisation de la lumière de jour au cours de la conception architecturale en suivant l'approche inverse qui, au regard des problèmes de lumière naturelle, de conception assistée par ordinateur seraient susceptibles de répondre aux diverses interrogations et d'arriver à éclairer naturellement et suffisamment un espace , d'assurer le confort visuel ou encore de donner des solutions pertinentes au regard des économies d'énergie, en répondant aux objectifs suivants :

- Développer un outil pédagogique qui sera à la portée des étudiants/architectes et qui répondra à leurs attentes en leur fournissant une aide à la décision en éclairage naturel.

- Améliorer la qualité spatiale des futurs projets par la prise en compte des intentions du concepteur en matière de confort et d'ambiance lumineuse dès la phase de l'esquisse.

- Arriver à un respect des contraintes d'éclairage à l'intérieur des projets d'architecture par le calcul des propriétés de ces ouvertures en utilisant un modèle numérique de simulation inverse.

- Réduire la durée de conception ou de simulation d'éclairage d'un projet par la diminution de va et vient entre dimensionnement des ouvertures et évaluation du niveau d'éclairement intérieur voulu.

LA METHODOLOGIE

La méthodologie adoptée dans ce mémoire sera basée sur le paradigme de l'approche déclarative proposée par Daniel Siret, représentée par la notion de « simulation inverse » et développée de manière pratique pour une ambiance particulière « l'ensoleillement ». Dans cette proposition, le projet architectural est considéré comme un "double processus de démarcation simultanée de formes et d'intentions réalisé par la notion intermédiaire d'effet." [Siret, 1997]. Sur cette base, cette recherche consiste donc à développer un outil d'aide à l'optimisation de l'ensoleillement et à vérifier la possibilité de son intégration dans la conception architecturale. Il existe plusieurs techniques, démarches et outils permettant l'étude de l'éclairage naturel dans le bâtiment qui peuvent être des modèles mathématiques, des programmes de simulation ainsi que des modèles réduits. Mais la question fondamentale posée s'interroge : sur quelles techniques et technologie on peut se baser pour atteindre cet objectif ?

Pour cela, nous avons structuré notre la présentation de notre mémoire en deux parties complémentaires. Une première à caractère théorique qui a pour but de présenter le contexte paradigmatique dans lequel s'insère notre recherche. Cette partie est constituée du chapitre I traitant d'une part, la conception comme processus complexe de formulation/résolution des problèmes et faisant objet de nombreuses contributions à travers les cultures et à travers les périodes de l'histoire et dans d'autre part, la éclairage naturelle comme élément physique ayant un rôle important dans l'espace architectural et faisant partie des problèmes de

conception architectural. Le chapitre II constitue l'argument de notre choix pour l'approche déclarative, cela en montrant quelques limites de l'application de la simulation directe dans la conception architecturale 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 est à caractère pratique et va nous permettre, à travers le Chapitre III, d'expliquer les différentes étapes de développement de notre modèle numérique par les calculs mathématiques amenant à un dimensionnement d'un élément d'ouverture (fenêtre ou autres) permettant la réalisation d'une quantité d'éclairement répondant à une intention déclarée par un concepteur. Une méthode de validation comparative basée sur les résultats du calcul est ensuite utilisée pour valider les résultats du modèle développé. A travers le chapitre IV, nous montrerons les résultats de l'application du modèle développé dans une situation réelle de conception auprès des étudiants d'architecture. L'étude du rapprochement des résultats nous donnera une idée sur les opportunités que peut-nous offrir l'utilisation, par les concepteurs/étudiants, de notre modèle pendant les premières phases de conception, lorsque les grandes lignes ne sont pas encore faites. Pour finir, nous concluons notre travail de recherche de façon générale et nous présentons les perspectives futures de recherche.

PLAN DU MEMOIRE

Introduction générale.

Chapitre I : ***La notion de l'éclairage naturel dans le processus de conception architecturale.***

Chapitre II : ***Simulation classique et simulation inverse de l'ensoleillement dans le projet architectural.***

Chapitre III : ***Vers un modèle numérique de simulation inverse de l'ensoleillement.***

Chapitre IV : ***Application du modèle dans une situation réelle de conception des ouvertures.***

Conclusion générale et perspectives.

Chapitre I :

La notion de l'éclairage naturel dans la conception architecturale.

"Une œuvre architecturale est un message à plusieurs niveaux qu'il faut apprendre à décoder et dont la valeur croît avec la capacité d'articuler un nombre plus grand de messages hétérogènes. "

Henri VAN LIER

INTRODUCTION

Le métier d'architecte est considéré comme noble ; cela est dû au rôle important qu'ont les architectes dans la société en général et pour chaque individu. Les architectes assurent depuis l'antiquité jusqu'à nos jours le bien-être de l'être humain, que ce soit dans ses espaces extérieurs ou intérieurs, dans ses espaces sacré ou profane, pendant le déroulement de ses activités ainsi que dans le reste de sa vie. Cela est assuré grâce aux projets qu'ils conçoivent et implique l'importance de cet acte qui est «la conception architecturale».

Cette dernière, la conception architecturale, est aujourd'hui un objet privilégié de recherches, en témoigne le nombre et la diversité des travaux sur ce thème depuis une dizaine d'années. Vu la complexité du processus d'élaboration des projets architecturaux, les chercheurs avaient souvent recours à une opération dite d'abstraction du processus de conception et de conception architecturale. L'intérêt suscité par ces recherches semble résulter de la nécessité, dans le domaine d'architecture, à répondre aux questions qui se produisent et se reproduisent chez les concepteurs pendant toutes les instances de leur travail. Parmi ces questions, figure celle de l'optimisation de l'ambiance lumineuse au moyen d'un système d'éclairage basé sur la lumière naturelle. Cet élément vital pour l'être humain a été toujours considéré comme l'un des agents de la plastique architecturale les plus puissants dont l'architecte peut disposer en tant que médiateur fondamental.

Dans le cadre de notre recherche, le présent chapitre s'articule autour de trois axes principaux : premièrement ; présenter un modèle de conception comme un processus de résolution de problèmes, deuxièmement ; aborder l'éclairage naturel comme l'un des problèmes de la conception architecturale et troisièmement ; étudier la lumière comme support physique de l'éclairage naturel.

I. La conception comme processus de "Résolution de Problèmes"

Conséquence de son importance et de sa complexité, l'activité de conception faisait et continue de faire l'objet d'étude par les chercheurs dans différents domaines afin d'arriver à une véritable compréhension de cet acte. Les différentes contributions réalisées peuvent être organisées sous trois paradigmes : le paradigme introspectif à base de conjectures sur la manière dont les humains conçoivent, le paradigme applicationniste qui emprunte des modèles à d'autres domaines de connaissance en vue d'étudier la conception architecturale et celui des sciences de l'architecture qui offre un cadre scientifique pour le développement de recherches sur la conception architecturale. [Arrouf, 2006] Vu le cadre dans lequel s'insère notre recherche, l'objectif de cette section n'est pas de faire une analyse approfondie sur le processus de conception mais de tenter, à travers une revue des différentes contributions, d'englober la majorité des points de vue des chercheurs dans ce domaine afin d'en extraire une de ces principales caractéristiques.

I. 1. Le processus de conception chez les anglo-saxons

Chez les anglo-saxons, les modes de conception ont été souvent associés aux "design-methods" dont l'objectif était de mieux comprendre les principales vérités essentielles en vue d'aboutir à des solutions plus globales afin de réaliser une meilleure expérience pour les utilisateurs avec les systèmes dont ils dépendent.

Malgré l'existence d'autres approches et méthodes développées par cette communauté, le choix des "Design-methods" comme représentant était basé sur le caractère philosophique qui couvre ces approches. Les "Design-methods" représentent une partie que l'on peut qualifier comme majeure de la vision des anglo-saxons envers la conception en général et la conception architecturale en particulier. [Mazouz, 2008]

I. 1.1. La contribution de John Christopher Jones

L'organisateur de la conférence de Londres de 1962, John Christopher Jones, est considéré comme l'un des pionniers de la scientification de la conception, notamment avec son œuvre « design-methods » ; un ouvrage qui a été pour longtemps vu comme l'un des textes majeurs en conception/design.

La contribution de J.C Jones dans le domaine de la conception était sa déclaration que la conception se décompose en : premièrement, "**divergence**" : cette étape est selon lui « ….l'acte de l'extension de la limite d'une situation de conception de manière à avoir un

assez grand espace de recherche fructueuse dans lequel on essaie de trouver une solution ; on cartographie le territoire du problème. A la fin de cette étape, le problème se décompose en sous-problèmes qui peuvent chacun être résolu dans un isolement spécifique et en rapport avec des personnes différentes ». Deuxièmement, "**la transformation**" : cette étape est selon lui « ….le modélisme, le plaisir des éclairs de perspicacité, le jeu de changement ; cette étape peut se traduire de façon inattendue, à tout moment, mais…….ne doit être appliquée qu'après que la divergence ait été faite, c'est une étape pendant laquelle il y a une liberté de changer les sous-objectifs, d'ajouter ou de supprimer des fonctionnalités.» Troisièmement, "**convergence**": à ce stade, le problème est défini, les variables ont été identifiées et les objectifs ont été connus ; le travail du concepteur consiste à réduire les incertitudes secondaires progressivement jusqu'à ce que seulement un des nombreux modèles alternatifs possibles sera choisi ou laissé. [Hileman, 1998]

Selon J.C Jones, si un sous-problème imprévu se révèle, le processus de conception doit revenir au mode de transformation là ou toutes les variables peuvent être considérées.

I.1.2. La contribution de Christopher Alexandre

La thèse de doctorat en design-methods intitulée « notes sur la synthèse de la forme » fut réalisée par l'architecte et mathématicien anglais d'origine autrichienne Christopher Alexandre qui a fait apparaitre de nouveaux terrains de recherche en conception architecturale. Tout comme J.C Jones, Christopher Alexandre essayait aussi de diviser les problèmes de conception en appliquant la théorie de l'information. La méthode proposée consiste à construire un graphe représentant les variables ainsi que les relations entre elles par des arcs. Le problème initial est alors décomposé en sous-problèmes semi-indépendants, selon la partition minimisant le nombre d'arcs interceptés. Ensuite, Il triait ceux qui ont une interaction entre eux, ce qui conduisait à une division en plusieurs groupes ; les problèmes de chaque groupe sont ensuite résolus en dessinant un diagramme dans lequel les interactions sont adaptées ou inadaptées aux besoins des utilisateurs. Une telle décomposition permet alors de résoudre chaque sous-problème, puis de recomposer les sous-solutions obtenues en une forme globale. [Alexander, 1964]

I.1.3. La contribution d'Herbert Simon

Avec son ouvrage intitulé "Administratif behavior" publié en 1945, Herbert Simon (1916-2001) est l'un des théoriciens du processus décisionnel. En ce domaine, le point de vue

d'Herbert Simon s'éloigne de la théorie classique[1], ce qui l'a poussé à ébranler la mono-rationalité cartésienne pour ensuite dire que la rationalité est une « rationalité limitée » qui postule l'omniprésence du décideur et qui tient compte de ses limites.

Dès son jeune âge, H. Simon fut introduit à l'idée que le comportement humain peut être étudié scientifiquement. Après avoir collaboré avec plusieurs chercheurs comme Frank Modigliani, John Muth, David Hawkins et autres, Simon est convaincu dès 1954 que la meilleure façon d'étudier la résolution des problèmes était d'utiliser les ordinateurs. Cela l'a conduit à faire des travaux de recherche en faveur de l'«intelligence artificielle » ; une expression utilisée pour la première fois par John Mcarthny pour désigner le nouveau champ de recherche lors d'une rencontre organisée à Dartmouth Collège pendant l'été 1956. [Massie, 1992] Pour Simon, un être humain et un programme informatique font les mêmes étapes : ils scannent les données pour les modéliser ; ensuite, ils stockent les modèles en mémoire et enfin les appliquent pour faire des inférences ou des extrapolations. [R. Frantz, 2003]. Cela veut dire que la résolution du problème implique deux opérations de généralisation : d'un côté, une recherche sélective d'essai/erreur et dans un autre côté, la solution qui doit être une solution « satisfaisante ». [Quinet, 1994]

I.1.4. La contribution de Geoffrey Broadbent

Pendant ce temps, les approches de recherche sur la conception/design sont devenues courantes en Europe et aux États-Unis ; les design-methods ont été adoptées dans les programmes d'enseignement dans plusieurs écoles d'architecture et autres disciplines (comme celle qui eut lieu à l'école HFG à ULM en Allemagne à partir d'Avril 1966).

A la suite de cela, une rencontre a été organisée par Geoffrey Broadbent et Antony Ward en 1967 à Portsmouth intitulée "Symposium of Architectural Methods" ; cette rencontre a été organisée dans le but de la recherche d'une application/incorporation des connaissances scientifiques dans le processus de conception architecturale pour rendre les décisions rationnelles et les optimiser et tout cela, afin de s'adapter à la tendance dominante. [Broadbent, 1969]. Broadbent a commenté le symposium comme suit : « le symposium de 1967 a été un moment particulier dans l'histoire dans la mesure où un changement général dans la conscience a pris place dans la nature que Kuhn en 1962 appelait "changement de paradigme" » [Broadbent, 1981]

[1] **Théorie classique :** théorie du 18ème qui dépend fortement de la vision cartésienne du processus décisionnel.

I.1.5. La contribution de Horst Rittel

La réaction la plus remarquable est celle du chercheur et théoricien Allemand Horst Wilhelm Jacob Rittel qui avait fait la déclaration suivante : « la première génération des design-methods était simpliste, pas assez mature et n'était pas capable de répondre aux exigences de complexité des problèmes du monde réel, problèmes qu'il nommera « Wicked Problems » ou « problèmes méchants » [Rittel, 1972]. Dans leur article pour le "politique-science" intitulé « Dilemmas in general theory of planning, 1973 », ces derniers ont observé qu'il existe un grand nombre de problèmes de planification sociale qui ne peuvent pas être traités avec la manière linéaire classique qui caractérise ces approches analytiques [Ritchey, 2005].

Donc, Pour différencier ces problèmes des autres, ils les ont nommés « Wicked-Problems » et ils ont mis en place des critères qui permettent de les distinguer :

1. Il n'existe pas de formulation précise d'un problème épineux.

2. Les problèmes épineux ont des règles qui se produisent sans arrêt.

3. Les solutions de ces problèmes épineux ne peuvent pas être vues comme vraies ou fausses, mais plutôt comme meilleures ou mauvaises.

4. Il n'y a aucune solution immédiate ou ultime à un problème épineux.

5. Chaque solution à un problème épineux est un "one-shot opération" parce qu'il n'y a aucune possibilité de faire un apprentissage par essais et erreurs, toutes les tentatives comptent de manière significative.

6. Les problèmes épineux n'ont pas un décompte énumérable. Il y a plutôt un ensemble de solutions potentielles et une série d'opérations admissibles bien décrites qui peuvent être incorporées dans le plan.

7. Chaque problème épineux est essentiellement unique.

8. Chaque problème épineux peut être considéré comme un symptôme d'un autre problème.

9. Les causes d'un problème épineux peuvent s'expliquer de plusieurs façons. Le choix de l'explication détermine la nature de la résolution du problème.

10. Avec des problèmes méchants, le planificateur n'a pas le droit de se tromper.

[Ritchey, 2005]

I.1.6. La contribution de Karl Popper

Épistémologue et philosophe des sciences, Karl Raimund Popper est l'une des importantes personnalités qui ont marqué le XXe siècle par la grande diversité de ses écrits. [P.

Blanchenay, 2005] K. Popper pense avoir résolu le problème de production des connaissances qu'il appelle "le problème de Hume" en proposant une théorie épistémologique novatrice et audacieuse basée sur "**la conjecture et la réfutation**", [Popper, 1963].

Le point de vue de Popper repose sur l'idée que la connaissance commence avec un problème, un problème c'est d'abord une surprise : une attente est déçue, les événements ne prennent pas l'allure que l'on prévoyait, il faut faire face à la situation. L'idée de problème suppose qu'il y a dès le départ des attentes théoriques. Face à ces problèmes, il s'agit de proposer en guise de solutions des conjectures, dont l'examen critique permettra d'éliminer en les réfutant celles qui ne conviendraient pas. La solution trouvée soulève alors un nouveau problème qui à son tour requiert de former une nouvelle hypothèse et ainsi de suite. [Bouveresse, 1978] Le rôle fondamental de la réfutation est selon Popper le principal instrument pour promouvoir le développement de la connaissance. [Blanchot, 1999]

Des études de faisabilité de ce postulat sur le processus de conception architecturale ont été réalisées par plusieurs architectes praticiens qui ont permis de le confirmer et de mieux cerner la notion de conjecture appelée par l'auteur de l'enquête "générateur primaire". ce dernier constitue un point de départ pour l'architecte, un chemin frayé dans les dédales du problème. Ce premier générateur aide le concepteur à faire le saut créatif entre l'énoncé du problème et le concept de solution. Par ailleurs et dans un autre registre, d'autres chercheurs ont introduit la notion de « stéréotype » et la possibilité d'utiliser des solutions architecturales satisfaisantes comme des solutions toutes prêtes à intégrer dans une banque de données. Toutes ces méthodes semblent se rejoindre sur l'opportunité d'un concept de base qui serait le départ de tout essai de synthèse et de génération de la forme architecturale, ce qui permet d'asseoir une fois pour toutes ce paradigme et l'utiliser de manière extensive dans le but de pallier aux carences du modèle proposé dans les générations précédentes. [Mazouz, 2008]

I.1.7. La contribution de Nigel Cross

Ce professeur spécialisé dans les études de la conception à l'Open University au Royaume-Uni est l'un des premiers qui ont pensé à l'idée que la conception est une discipline qui a besoin de développer son indépendance intellectuelle par rapport à l'art et la science. Pour lui, la conception n'est pas simplement « sciences appliquées » mais plutôt une « application des connaissances scientifiques et autres connaissances organisées à des taches pratiques ».

Nigel Cross propose une « approche constructiviste » basée sur « une épistémologie de la pratique implicite dans le processus artistique et intuitif ». [Cross, 1982] Pour Nigel Cross, un travail de conception se déroule en trois espaces qui sont « espace de problèmes », « espace de solutions » et « espace de recherche ». [Cross, 2004] Ce dernier (espace de recherche) est l'espace dans lequel le concepteur fait, au début du travail de conception, encadrer[2] le problème en des sous-problèmes bien-définis pour ensuite générer un grand nombre de solutions alternatives ; mais, il faut que « l'encadrement du problème » et « la trouvaille d'une solution » se développent en coévolution.

I.2. Le processus de conception chez les Français

Comparée à celle des anglo-saxons, la contribution des français en matière du processus de conception peut être considérée comme plus récente. Les recherches réalisées par cette communauté étaient centrées sur des notions que l'on va présenter dans ce qui suit.

I.2.1. La contribution de Jean-Charles Lebahar

C'est un professeur, enseignant-chercheur français, dont la carrière est riche de nombreuses productions intellectuelles traitant notamment de l'analyse et de la didactique de l'activité de conception et en particulier de la conception architecturale. Durant ces années de recherche, Lebahar essayait toujours d'examiner la conception à partir de l'analyse de l'activité du sujet concepteur[3] qui concevait des artefacts[4]. [Lebahar, 2007]

L'activité de conception est vue par Lebahar comme la construction et la communication d'un modèle d'artefact ne résultant pas de la réplique d'un modèle existant mais par la mise en œuvre d'une compétence de conception. Cette compétence se compose de fonctions cognitives (mémoire, cycles hypothético-déductif, perception, langage, raisonnement, etc…) et de connaissances exprimées sous forme de schèmes (représentations, concepts, schémas, procédure, etc…). Ces compétences se nourrissent par l'acquisition, de la part du concepteur, de savoir et de savoir-faire objectivés et hérités depuis différentes sources. [Leplat, 2008] Lebahar soutient l'idée que l'activité de conception est toujours une situation de résolution de problème qui met l'architecte face à une évidence de produire une solution ; il définit le

[2] **Encadrer** : le sens utilisé est le sens figuratif du mot.
[3] **Sujet concepteur :** expression dont l'abréviation est (S C) utilisée par l'auteur pour désigner le concepteur qu'il soit architecte ou autre.

[4] **Artefact :** c'est un modèle qui inspire et organise l'activité du sujet concepteur quand celui-ci en conçoit de nouvelles versions.

« problème » comme l'obligation devant laquelle est placée une compétence architecturale, de transformer l'état initial d'une représentation partielle et plus ou moins exacte d'un édifice, telle qu'elle est contenue dans une commande et dans son environnement de contraintes, en un état final qui en permet son interprétation en terme matériel sur un acte principalement intellectuel qui s'exprime par le dessin. [Lebahar, 1983] Donc, pour lui, la notion de « problème » offre une unité pour la connaissance sans pour autant tomber dans la réduction ; elle dédramatise les connotations mystérieuses de la notion de « projet » ; elle écarte l'obscurité qui l'isole de son contexte opérationnel et qui la situe au niveau des révélations inaccessibles. Une telle transformation a deux dimensions : l'une s'exprime en termes d'« état » et l'autre en termes de « traitement ». Chaque problème rencontré dans ce processus engendre un traitement précis à un moment donné. Ce dernier transforme l'état initial d'une représentation graphique en son état suivant, qui peut parfois, être vu comme état final.

I.2.2. La contribution de Philippe Boudon

Philippe Boudon est un architecte et urbaniste français né en 1941 qui a focalisé ses travaux de recherche sur les opérations cognitives propres à l'architecte lors du travail de conception. Pour Boudon, l'architecture est une pratique "holiste" car elle demande une vision globale, générale et universelle des choses du monde. [Boudon, 1993]

Boudon part de l'idée que l'architecture est souvent mise en lumière par des sciences ayant d'autres objets que l'architecture pour ensuite essayer de créer une science de l'architecture "une architecturologie" qui consiste à trouver une connaissance rendant compte de la spécificité de l'architecture, une science qui aura pour objet l'architecture elle-même, c'est-à-dire le projet. [Boudon, 1971] De là, Boudon définit l'architecturologie comme une sorte de "métathéorie" architecturale, c'est-à-dire des systèmes d'instructions donnés pour l'édification d'un objet architectural allant de l'objet concret « modèle à copier » aux systèmes abstraits de règles. [Simon, 2006]

Boudon pose aussi le problème d'ambiguïté en matière de la commensurabilité des diverses représentations de l'espace de travail de l'architecte pour ensuite le définir comme un ensemble de deux espaces, l'espace vrai et l'espace mental avec projection réciproque de l'un dans l'autre. Selon lui, le passage entre ces deux espaces est réglé par l'échelle. Il ajoute aussi que l'échelle est le premier concept spécifique de l'architecture ; elle constitue la différence entre l'architecture et la géométrie parce qu'elle existe dans la

pensée de l'architecte et non dans celle du géomètre. [Le Moigne, 1991] Il considère les échelles comme les mesures d'espaces non architecturaux (économique, technologique, humaine, urbanistique,…) auxquelles l'architecte fait référence dans son espace de conception multidimensionnel pour réaliser un espace réel. L'échelle est en architecturologie un « complexe opérateur symbolique » et non un « opérateur d'homothétie classique ». [Simon, 2006] L'échelle est l'objet d'une connaissance de l'espace architectural de conception dont les lois régissent le passage de l'espace idéal à l'espace réel » [Raynaud, 2002]

Dans son livre nommé "La ville de Richelieu" publié en 1972, Boudon finit par annoncer l'existence de différents types d'échelles : ceux qui renvoient à l'espace réel lui-même, à un référent extérieur, à sa représentation et ceux qui font fonctionner les allers retours entre les différents espaces). Il les considère comme « espaces de référence de la conception architecturale » [Boudon, 1972]

I.2.3. La contribution de Dominique Raynaud

Dominique Raynaud est un chercheur français en sociologie des controverses scientifiques et des architectures comparées. Raynaud fait avancer l'idée admise par certains designers et chercheurs que la conception est un espace d'actions finalisées et que le but, avant d'être confondu avec le résultat, doit être pris pour ce qu'il est : une représentation mentale antérieure à l'action. [Raynaud, 1999]

Pour Raynaud, la conception architecturale est envisagée comme un processus dans lequel importent moins les états que les opérations qui permettent de passer d'un état à un autre ; l'usage d'opérations signifie que la connaissance du modèle-source, de l'opérateur et des pertinences, doit permettre la reconstruction du modèle-but. La résolution des problèmes de conception architecturale est selon Raynaud multimodale et peut conduire à une détermination du résultat, pour autant que le point de vue soit spécifié. [Raynaud, 1999]

Raynaud montre qu'il est utile de représenter un projet quelconque par une suite d'états (mentaux ou matériels) répartis entre un état initial et un état final du projet architectural. Ces changements d'état doivent alors être décrits à partir d'opérateurs de la conception architecturale qui sont selon lui "Les schèmes". Dans un essai de définir les schèmes d'action, ceux qu'il juge les plus représentatifs des changements morphologiques du projet architectural, Raynaud montre que ces opérateurs peuvent être définis comme un verbe

d'action qui, une fois multiplié, peut faire l'objet d'une analyse parasynonymique[5] afin de construire une liste de schèmes. Ensuite, une analyse comparée et appliquée à un échantillon composé de plusieurs bâtiments permet de reconnaître, parmi eux, pas mal de schèmes permettant de générer des formes architecturales. [Raynaud, 1999]

Le schème est selon lui, dynamique, non-substantif, global et générique. Ces critères permettent d'effectuer un tri grossier entre verbes adéquats et verbes inadéquats à une perspective de description synthétique des actions. [Raynaud, 2003]

L'importance du schème a été quant à elle entrevu selon Raynaud à partir de trois études interdépendantes de la conception architecturale : Le schème permet de modéliser l'association entre les formes architecturales et les représentations. [Raynaud, 1990] Il modélise la conservation des traits figuratifs de la représentation. [Raynaud, 1994] et modélise les opérations de conception qui affectent la structure du modèle morphologique. [Raynaud, 1999]

I.2.4. La contribution de Robert Prost

Robert Prost est un ingénieur–architecte, auteur de nombreux travaux sur la planification et les sciences de l'action. Prost avait une vision "globale/globaliste" dans le domaine de la recherche concernant la conception architecturale. Sa réflexion ne prend pas cette dernière sous l'angle spécifique de la « projetation » mais suivant la perspective générale qu'offrent les différents regards théoriques sur les processus de formulation/résolution de problème. [Archi.fr] [Prost, 1995] Pour lui, la généralité du champ d'investigation sur ces processus de formulation/résolution de problème orientera la réflexion non seulement sur le « concepteur » mais aussi sur l'ensemble des acteurs inhérents au processus de conception. [Prost, 2000] Selon Prost, il n'y a donc pas un problème de conception pas plus qu'il y aurait un concepteur mais une multitude de registres de problèmes dont chacun d'eux renvoie pour sa résolution à une grande variété d'acteurs, de rationalité, d'objectifs, de technologies, de savoir et de savoir-faire. Le processus de conception n'est donc pas linéaire mais dynamique et la solution émergente est le résultat d'une démarche itérative comportant de nombreux bouclages entre les registres de problèmes et les acteurs qui en assurent la résolution. De même, les acteurs de

[5] **Parasynonymique :** Terme qui possède le même sens qu'un autre, mais dont la distribution et/ou le registre d'emploi n'est pas exactement identique [larousse.fr]

la conception ne sont pas juxtaposés de manière linéaire suivant un temps chronométrique qui partirait de la formulation du problème jusqu'à l'énoncé d'une solution.

Prost montre également qu'un énoncé de problème en architecture n'est pas le point de départ comme le considèrent souvent les concepteurs, mais le résultat d'un processus de formulation plus ou moins complexe mettant en jeu des situations factuelles faisant « problème ». En ce sens, Prost ajoute qu'un problème formulé contient déjà des éléments qui orienteront de manière significative la recherche d'une solution et, pour cette raison, les processus de formulation de problème sont parties intégrantes de problème de la conception. Les relations multiples entre chaque composante impliquent selon Prost qu'un énoncé ne se construit pas par l'addition pure et simple de chacune des composantes identifiées. Il s'établit progressivement à partir de choix singuliers opérés sur chaque composante ainsi que par le biais de nombreux bouclages entre chacune d'entre elles. L'ensemble de ces opérations constitue ce qu'il appelle un processus de formulation de problème qui est, lui-même, premier pôle d'un processus plus général englobant l'ensemble des pôles attachés à la notion de conception. L'essentiel étant dans la complexité du parcours et non pas dans la hiérarchie suivant laquelle chacune des composantes intervient. [Prost, 2000]

Prost conclu que la conception procède d'un enchevêtrement entre des énoncés normatifs qui fondent la notion même de problème et celle de solution et des énoncés descriptifs et/ou explicatifs qui permettent de développer les dimensions caractéristiques factuelles attachées au problème et à la solution. A ces deux types d'énoncés, on peut ajouter, selon Prost, le couple des fins et des moyens pour différencier dans le système d'action deux catégories nécessaires, puisque ne retenir que les fins ne conduirait qu'à des projets utopiques sans consistance au-delà de la connaissance qu'ils renferment et ne prendre en charge que les moyens reviendrait à ne considérer, dans un résultat, que le fait qu'il existe et non le pourquoi de son existence : ce serait entre autres réduire le statut de projet à celui d'objet réel (idéologie de l'activisme, de l'action en soit).

I.3. Récapitulation

A l'issue de cette étude relativement subjective et orientée des recherches autour du processus de conception, il est constatable que cette dernière était, à travers les périodes de l'histoire et à travers les cultures, considérée comme un processus de formulation/résolution de problèmes.

Les chercheurs ont donc essayé de formuler des représentations synthétiques du processus de conception autour de cette notion (notion de problème). Pour eux, une compréhension du processus de conception passe impérativement par une bonne étude de la notion de problème dans les différentes phases de la conception. Le tableau suivant montre l'existence de la notion de problème dans la majorité des contributions étudiées.

I.3.1. Tableau récapitulatif

	Le contribuant	La contribution
Anglo-saxons	J.C. JONES	La conception se décompose de : « divergence–transformation-convergence » de problèmes.
	C. ALEXANDRE	Diviser les problèmes de conception en appliquant la théorie de l'information.
	H. SIMON	La résolution du problème de conception implique deux opérations de généralisation : - une recherche sélective d'essai/erreur - la solution qui doit être une solution « satisfaisante »
	G. BROADBENT	Rendre les décisions rationnelles et les optimiser afin de s'adapter à la tendance dominante.
	H. RITTEL	« Wicked Problems » : mettre en place des critères de différenciation entre les problèmes de conception.
	K. POPPER	"la conjecture et la réfutation" : principal instrument pour promouvoir le développement de la connaissance.
	N. CROSS	Un travail de conception se déroule en trois espaces : « espace de problèmes » « espace de solutions » et « espace de recherche ».
français	J.C. LEBAHAR	L'activité de conception est une situation de résolution de problème qui met l'architecte face à une évidence de produire une solution.
	PH. BOUDON	l'architecturologie consiste à trouver une connaissance rendant compte de la spécificité de l'architecture et l'échelle comme régulateur de cette activité.
	D. RAYNAUD	La résolution des problèmes de conception est multimodale et peut conduire à une détermination du résultat, pour autant que le point de vue soit spécifié.
	R. PROST	la généralité du champ d'investigation sur le processus de formulation/résolution de problème orientera la réflexion non seulement sur le « concepteur » mais aussi sur l'ensemble des acteurs inhérents au processus de conception.

Tableau (01) : Représentation d'une récapitulation des contributions.

I.3.2. Caractéristiques des problèmes de conception

Les caractéristiques des problèmes de conception ont été résumées par Daniel Gilbert dans son livre « Réalisme et architecture » comme suit :

- La formulation des problèmes de conception n'est jamais définitive.
- Chaque problème est unique parce qu'il est situé différemment.
- Chacun des problèmes est imbriqué dans un ensemble de problèmes de niveau supérieur.
- La résolution du problème ne comprend pas de liste exhaustive d'opérations possibles ; tout est permis et rien n'est obligatoire.
- Il n'existe pas de règle d'arrêt à la solution du problème, la terminaison du processus de conception provenant de pressions extérieures. [Guibert, 1987]

I.3.3. Modèle du projet architectural proposé par Daniel Siret

Selon Daniel Siret, les caractéristiques de la notion de "Problème" permet de considérer la conception 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.

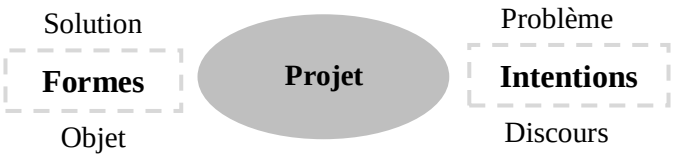


Fig (01) : Représentation des classes d'éléments constituant le projet architectural.

Afin de démarquer les formes et les intentions du projet, Siret introduit un troisième élément qu'il nomme "**Effet**". Ce dernier permet de confronter les formes et les intentions dans un projet. L'effet représente selon Siret une interprétation des unes relativement aux autres dans les divers registres du projet. Ce qui conduit à l'apparition de deux phénomènes d'émergence: l'émergence des intentions par les formes et l'émergence des formes par les intentions. Ces phénomènes représentent selon Siret la dynamique de la conception.

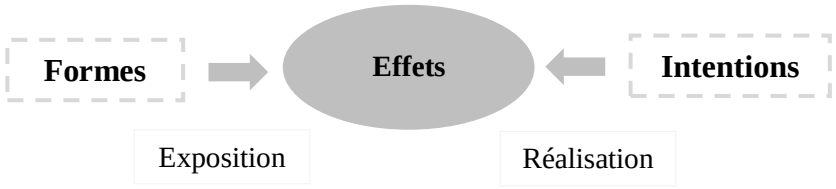


Fig (02) : Représentation de la classe d'effet dans le projet architectural.

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]

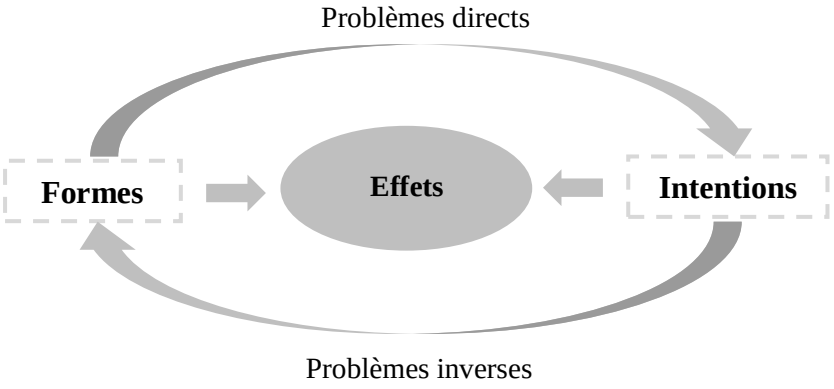


Fig (03) : Représentation de la dynamique du processus de conception architectural.

II. L'ambiance lumineuse comme l'un des problèmes de conception architecturale

Vu le cadre de notre recherche, l'étude et la compréhension de tous les problèmes dans le projet architectural est difficile voire impossible. Pour cela, nous avons choisi l'éclairage naturel comme l'un des problèmes dont fait face tout architecte lors de la conception de projet architectural.

II.1. Définitions

II.1.1. Définition de l'ambiance lumineuse

Dans un espace donné, la lumière et l'obscurité interagissent avec l'individu : physiologiquement : les yeux, le corps, perçoivent la lumière mais cette perception varie selon les individus comme au cours de leur vie ; psychologiquement : le cerveau analyse la lumière et l'espace et en donne une lecture mentale, et culturellement : en fonction de l'observation, de son origine géographique, de son vécu, de ses connaissances, de son état d'esprit. [Narboni, 2006] Cette interaction entre la lumière et l'obscurité donne naissance à l'ambiance lumineuse ; cette dernière peut être définie comme un phénomène qui relève de points de vue multiples : elle renvoie à des phénomènes physiques (propagation d'une onde, réflexion/absorption de la lumière par une matière), à des phénomènes socio-humains (capacité oculaire, besoin de lumière lié aux usages…) ou encore à des phénomènes sensibles et esthétiques (sensation liées à la lumière, émotions, ressenties dans un espace…). [Chaabouni, 2007]

Pour Jean-François Augoyard, un ensemble de phénomène localisé peut exister comme ambiance lorsqu'il répond à quatre conditions :

1. les signaux physiques de la situation sont repérables et décomposables.

2. ces signaux interagissent avec la perception, les émotions et l'action des sujets ainsi qu'avec les représentations sociales et culturelles.

3. ces phénomènes composent une organisation spatiale construite.

4. le complexe (signaux/percepts/représentation) est exprimable.

On peut aussi décrire l'ambiance lumineuse à travers les effets lumineux qui la composent : l'effet d'ambiance est lié à une cause circonstancielle qui décrit la relation entre la source d'un phénomène physique et l'interprétation de l'observateur. Il permet de qualifier le lien

entre la perception et le milieu, suivant les attitudes neurophysiologiques, la culture et l'état d'esprit de l'observateur. [Chelkoff, 1992]

Le rôle de l'ambiance lumineuse dépend du sens qu'elle donne à l'espace. La dualité de l'homme/milieu est un élément fondamental de la notion d'ambiance ; ces différentes définitions de l'ambiance lumineuse mettent presque toutes en avant l'interaction entre l'espace éclairé et le sujet. [Chaabouni, 2007]

L'ambiance lumineuse peut être analysée selon quatre fonctions différentes:

- fonction utilitaire car elle permet la vision et le déplacement dans l'espace.

- signalétique pour le repérage ou le guidage vers les limites d'un lien.

- esthétique ou décorative : elle valorise l'endroit dans son ensemble ou certaines de ses parties.

- sensorielles, déterminant la perception de cet espace et l'impression qui en substituera dans notre mémoire. [Narboni, 2006]

II.1.2. Définition de l'éclairage naturel

L'éclairage naturel est généré par la répartition de la lumière naturelle pénétrant un espace construit. C'est le résultat de la propagation de la lumière à travers l'enveloppe et de la réflexion de cette dernière par les matériaux constituant le bâtiment [Tourre, 2007]

Le rôle et l'importance de l'éclairage naturel a été souvent l'objet de citations des architectes comme le montre celle de Le Corbusier lors de l'achèvement de son projet LE COUVENT DE LA TOURETTE ; *« Qu'est-ce que l'éclairage ? Ce sont des murs qui reçoivent une lumière, ce sont des murs éclairés, l'émotion vient de ce que les yeux voient, c'est-à-dire les volumes, de ce que le corps reçoit par impression ou pression de murs sur soit même… »*

II.2. Exemples de prise en compte de l'éclairage naturel dans la conception des projets architecturaux

Nous tenterons de montrer des exemples de prise en compte, par des architectes, de l'éclairage naturel au cours de la conception pour réaliser leurs intentions d'ambiance lumineuse. Les exemples représentatifs sont choisis de manière subjective parmi la panoplie

de ceux inclus dans l'ouvrage de Derek Phillips intitulé "Daylighting, Naturel light in architecture" publié par l'édition néerlando/britannique ELSEVIER en 2004.

II.2.1. L'exemple du "Dôme du Palais du Reichstag" par Norman Foster

Parmi les principes adoptés par l'architecte lors de la reconstruction du palais du Reichstag était l'utilisation optimale de la lumière naturelle dans tous les espaces du bâtiment afin de minimiser le recours à l'éclairage artificiel et réduire ainsi la consommation d'électricité.

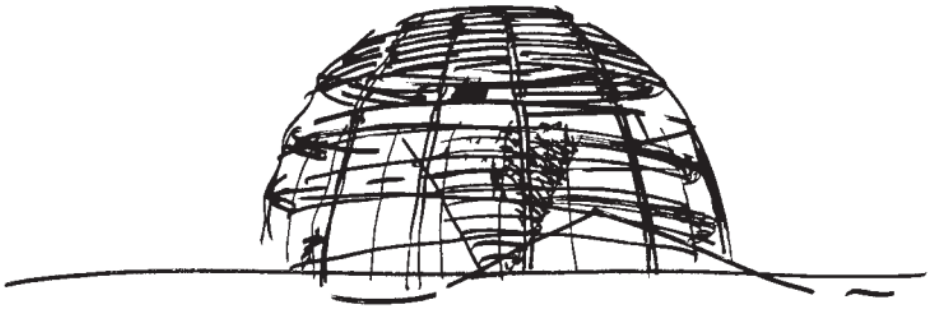


Figure (4) : esquisse de Norman Foster pour le dôme du Reichstag.
Source : Phillips (2004)

Situé au-dessus de la chambre plénière, le dôme comporte dans son espace intérieur un gigantesque cône en verre réfléchissant. Ce dernier est conçu pour conduire de manière naturelle la lumière du jour jusqu'aux espace inférieurs du bâtiment. Pendant la nuit, le parcours de la lumière s'inverse et le dôme de jouer un rôle symbolique en devenant un phare lumineux permettant le repérage du bâtiment par rapport à la ville de Berlin. [Phillips, 2004]

Fig (5) : intérieur du dôme.

Fig (6) : le dôme pendant la nuit.

II.2.2. L'exemple de "De Syllas House" par Justin De Syllas

Cette maison conçue par l'architecte De Syllas pour son propre usage montre un exemple d'utilisation prudente de l'éclairage naturel dans un espace à caractère résidentiel.

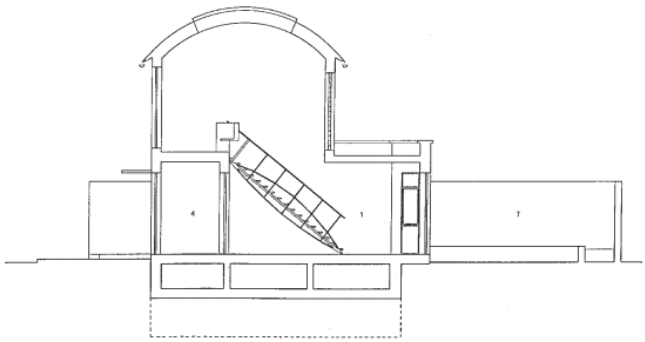


Fig (7) : Coupe-esquisse montrant le principe de conception de la maison "De Syllas House".

L'ambition déclarée par l'architecte était de concevoir un grand espace de vie dans lequel la lumière naturelle pénètre à tout moment du jour. Cela a été concrétisé par l'architecte au niveau de la façade par l'insertion de grandes baies vitrées au côté Sud assurant le chauffage de la maison par la pénétration des rayons solaires pendant l'hiver. Ces baies sont équipées d'auvents extérieurs pour empêcher la surchauffe solaire et assurer la ventilation pendant l'été. A l'intérieur, l'organisation des espaces en double hauteur permettait à l'architecte d'amener la lumière du jour jusqu'aux différents coins de la maison. [Phillips, 2004]

Fig (8) : façade de la maison "De Syllas House".

Fig (9) : le séjour de la maison "De Syllas House".

II.2.3. L'exemple de "Orchard Learning and Resource Centre" par Ahrends Burton, Koralek et Ove Arup and Partners

Situé dans la région de Selly à Birmingham, l'Orchard Learning and Resource Centre représente le fruit d'une collaboration entre designer et ingénieur en matière des techniques d'éclairage et de ventilation naturelle.

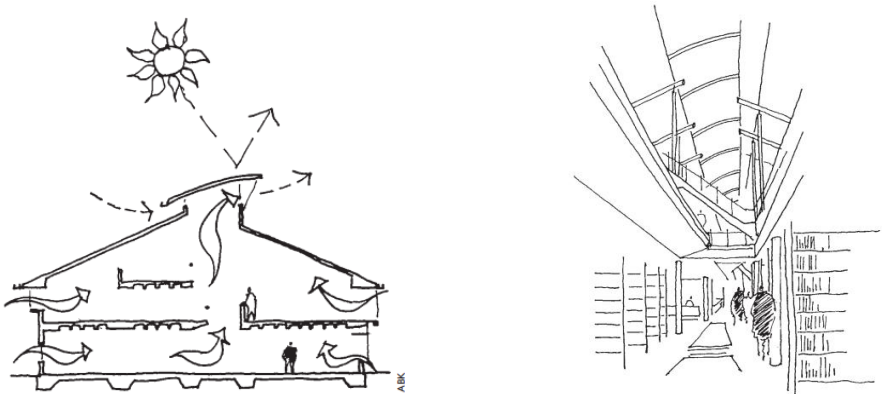


Fig (10) : Coupe-esquisse montrant les ambitions des concepteurs pour le "Orchard Learning and Resource Centre"

L'orientation Est/Ouest des façades les plus longues et la présence d'arbres à feuilles caduques permettaient au bâtiment de bénéficier au maximum des opportunités du soleil pendant l'hiver et d'assurer son contrôle durant l'été. A l'intérieur, la majorité des espaces y compris l'espace clé du bâtiment « la bibliothèque » sont organisés sur les deux rives d'un Atrium central. Ce dernier, en compagnie des baies latérales, assure un éclairage naturel à tout moment du jour. [Phillips, 2004]

Fig (11) : Façade principale du "Orchard Learning and Resource Centre"

Fig (12) : l'espace Bibliothèque dans le "Orchard Learning and Resource Centre"

II.2.4. L'exemple de l'"American Community School, Sports Centre" par les architectes du Studio E-Architects.

Implanté dans un terrain en pente au milieu des bois, le complexe sportif de l'American Community School a été conçu de manière à assurer le maintien d'une relation visuelle entre espaces intérieurs et environnement extérieur avec un éclairage naturel prenant en compte les caractéristiques du projet.

Fig (13) : Maquette du projet montrant les ambitions des architectes.

Au niveau de la piscine, l'insertion des baies vitrées sur les trois façades a été rendue possible grâce au choix de l'orientation du volume Nord/Ouest. Pour la salle de sport, des fenêtres en bande placées en haut contribuaient à un espace uniformément éclairé par la lumière naturelle et assurait le bon fonctionnement de l'activité sportive. [Phillips, 2004]

Fig (14) : l'intérieur de l'espace piscine.

Fig (15) : l'intérieur de la salle de sport.

II.2.5. L'exemple de "Gridshell Building, Weald and Downland Museum" par Edward Cullinan et Buro Happold

Construit sur le lieu d'un bâtiment industriel, la conception du musée Weal and Downland a nécessité un grand espace ouvert. En plus de leur volonté de répondre à cette contrainte, les architectes montrent dans leurs premières esquisses un deuxième objectif de conception, celui de l'adoption de la lumière naturelle comme principale source de l'éclairage intérieur.

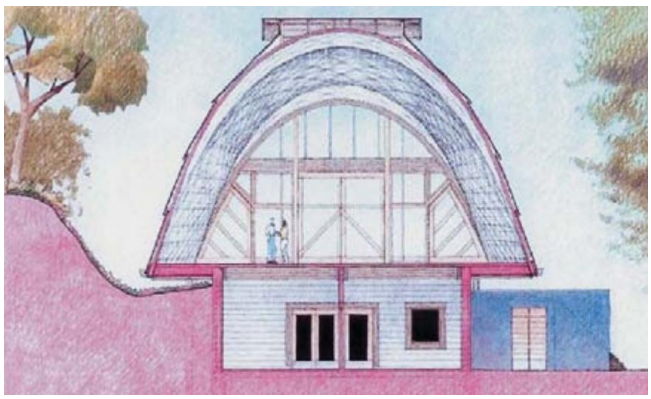


Fig (16) : Coupe-esquisse montrant l'insertion du projet dans son environnement.

Les formes ainsi que les matériaux utilisés et l'emploi de la Gridshell permettaient aux architectes de proposer un système d'éclairage naturel sous forme de lignes continues laissant pénétrer la lumière du jour tout au long de l'espace. Sur le toit, une série de lanterneaux est installée afin de produire une ambiance lumineuse agréable et adaptée à toutes les conditions saisonnières. [Phillips, 2004]

Fig (17) : l'extérieur du projet.

Fig (18) : l'espace principal du projet.

II.3. Récapitulation

De manière générale, les exemples précédemment présentés montrent que certains architectes savent utiliser la lumière naturelle au cours de la conception pour assurer la réalisation de leurs intentions en matière d'ambiance lumineuse.

- Cette intérêt donné par les architectes à l'interaction entre le projet architectural et l'environnement lumineux extérieur montre l'importance de ce dernier dans l'espace architectural bâti.

- Les traces de l'éclairage naturel au niveau des esquisses des architectes donnent quant à elles une idée sur la possibilité d'intégration de cet élément parmi les générateurs de la forme des espaces bâtis.

En imaginant des formes, ses dimensions et d'autres propriétés liées aux éléments d'ouverture, les architectes tentent au cours de leur conception de projeter des ambiances lumineuses qui apporteront une qualité sensible aux espaces tout en satisfaisant les exigences d'éclairement liées aux différents usages de ces espaces. Les exemples précédemment cités montrent que les concepteurs cherchent très tôt à formaliser une intention d'ambiance lumineuse et ils font pour cela appel à des références et en particulier à des références visuelles qui jouent le rôle de dispositifs heuristiques. « Le terme de "références" est utilisé pour désigner des objets de médiation qui aident les concepteurs à énoncer leurs problèmes et/ou à imaginer des solutions, ils permettent d'explorer des intentions et des solutions pour le projet en cour de conception ». [Chaabouni, 2007]

Sur cette base, toute tentative d'instrumentation de la conception des ambiances, dès les premières phases de conception avec des procédures référentielles peut être considérée comme une approche possible. Vue le cadre de notre recherche, nous prenant en compte que les référence qui ont pour but d'assurer le coté qualitatif d'une ambiance lumineuse produite par un éclairage naturel. Pour cela, nous tentons dans la section suivante de comprendre la lumière naturelle (sa nature, son parcours naturel jusqu'à l'espace architectural bâti ainsi que les unités et instruments permettant son mesure).

III. La lumière naturelle comme support physique de l'éclairage naturel

III.1. Un bref aperçu

Depuis des milliers d'années, la compréhension de la lumière était l'une des préoccupations de l'être humain qui essayait de la maitriser, parfois avec des approches philosophiques et religieuses et d'autre fois, avec des approches purement scientifiques dans le domaine de la physique.

Les premières théories concernant la lumière remontent à l'époque de l'antiquité avec, à titre d'exemple, les travaux de Pythagore (580-495 av. J-C), de Démocrate (460-370 av. J-C), d'Aristote (384-322 av. J-C) ainsi que ceux d'Euclide (325-265 av. J-C) qui ont montré que la lumière se propage en ligne droite. Du point de vue expérimental, le XVIIème siècle est considéré comme le siècle de la naissance de la première théorie permettant la compréhension de la propagation de la lumière naturelle « l'optique géométrique » proposée par "Isaac Newton" et dans laquelle la lumière est définie comme un ensemble de rayons formés de particules qui se déplacent en ligne droite. Les changements de direction sont calculés en utilisant les règles géométriques de Snell -Descartes associées à ce modèle. Au XIXème siècle, Christian Huygens introduit une nouvelle théorie permettant de mettre en évidence le caractère ondulatoire de la lumière : c'est le propos de l'optique ondulatoire dans laquelle la lumière est considérée comme une onde électromagnétique se propageant dans le vide avec une vitesse déterminée. Le XIXème siècle est aussi celui ou la mesure de la vitesse de la lumière s'est améliorée, notamment, grâce à l'expérience de la roue dentée de Hippolyte Fizeau en 1849 et à l'expérience du miroir tournant de Léon Foucault en 1853. Au début du vingtième siècle, une nouvelle théorie de la lumière naturelle voit le jour, c'est l'optique quantique postulée par Albert Einstein en 1905 : théorie dans laquelle la lumière est à la fois ondulatoire et corpusculaire, comme la matière. Cette théorie a permis donc de modéliser de manière générale les interactions entre la lumière et la matière.

III.2. Introduire la lumière de jour au bâtiment

Quelle que soit sa nature, la lumière naturelle fait son apparition en étant projetée par une source. Cette dernière peut être définie comme un corps (un point, une surface ou un volume) qui émet une énergie rayonnante (lumière) autour de lui. Pour la lumière naturelle, on distingue deux sortes de sources : les sources dites primaires : ce sont des corps ayant une température très élevée leur permettant de produire ce qu'ils émettent comme lumière : le soleil, les étoiles et les astres sont les différentes sources primaires de lumière naturelle sur

terre. Les sources dites secondaires : ne produisent pas la lumière d'une manière autonome mais diffusent, dans toutes les directions, la totalité ou une partie d'une lumière reçue par une source primaire ; la voute céleste et l'environnement terrestre (les constructions) constituent les différentes sources secondaires de lumière naturelle.

A cause du mouvement continu de la terre autour d'elle-même et autour du soleil, la lumière naturelle varie de manière continue durant la journée en intensité de flux lumineux et en direction. Pour comprendre et évaluer son influence sur un site ou une construction, il est nécessaire de connaître la position du soleil dans le ciel. Pour cela, deux angles « solaires » nous donnent cette information. Il s'agit de l'**azimut** (la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil ; Il est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud. L'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest).Le second angle, c'est la **hauteur solaire** (l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal), la projection de ces différentes données sur un plan permet la construction du diagramme solaire.

III.3. Caractérisation de l'environnement lumineux extérieur (modèles de ciel)

On entend par modèle de ciel, un calcul analytique et/ou géométrique permettant de définir la distribution spatiale de la lumière naturelle sur la voute céleste, cela en donnant, pour chaque point de cette dernière, une valeur de luminance énergétique en ($W/m^2 \cdot sr$) ou lumineuse en (cd/m^2) valable sur toute l'étendue de l'élément et calculée en son centre de gravité. Les paramètres à prendre en compte pour la caractérisation d'un modèle de ciel sont le type de ciel, la position d'un élément de ciel considéré sur la voûte céleste (repéré par son angle zénithal, par son azimut ou par son altitude) et la position du soleil (repérée par son altitude et son azimut eux-mêmes calculés à partir de la position géographique du lieu d'étude (latitude) et de l'heure à laquelle sera effectué le calcul). [Miguet, 2000] [Chain, 2004]

Vu l'importance du nombre de types de ciels existants et la multitude des conditions météorologiques et afin de faciliter les études d'éclairement, quatre types de ciels standards ont été établis par la commission internationale d'éclairage (CIE). Chacun d'eux est caractérisé par la manière selon laquelle la luminance se réparti dans la voute céleste ; cette variation de la répartition fluctue en fonction de la latitude, de l'altitude, de la saison et de l'heure. [Miguet, 2000] [Chain, 2004]

Ils sont classés par ordre de complexité comme suit : Le ciel uniforme : c'est le modèle le plus simple ; il correspond à un ciel couvert d'une couche épaisse de nuages laiteux ou à une atmosphère pleine de poussières ou le soleil n'est pas visible : sa luminance est indépendante des paramètres géométriques et elle est constante en tout point du ciel à un moment donné. Le deuxième est le ciel couvert CIE ; c'est un modèle établi par la Commission Internationale de l'éclairage (CIE) ; il correspond à un ciel de nuages clairs cachant le soleil : sa luminance varie en fonction de la position de chaque point par rapport à la voûte céleste. Le troisième est le ciel clair (sans soleil) ; c'est un modèle qui simule la composante diffuse de l'éclairement d'un ciel serein qui émet un rayonnement diffus dépendant de la variation de la position du soleil et qui exclut le rayonnement solaire direct : sa luminance varie en fonction des paramètres géométriques et de la position du soleil. Le quatrième et dernier modèle est le ciel clair (avec soleil) ; Il correspond à un ciel serein ou le soleil brille, c'est le plus compliqué d'entre eux car il prend en compte le rayonnement global[6] alors que les trois modèles précédents ne font intervenir que la composante diffuse de rayonnement solaire ; il offre la possibilité d'étudier les jeux d'ombres et de lumière ainsi que les risques d'éblouissement dus à la pénétration du soleil dans un bâtiment

III.3.1. Modèle de ciel de Moon & Spencer

Au milieu des années 1950, une grande variété de modèles de ciel est apparue ; parmi eux, il y a celui présenté par Moon & Spencer en 1942 et adopté par la CIE en 1955 : ces deux auteurs présentent un ciel parfaitement couvert défini par une couverture nuageuse épaisse et uniformément répartie sur toute la voûte céleste qui diffuse entièrement le rayonnement direct (diffusion par les nuages essentiellement, astre solaire invisible). Elle traduit des conditions atmosphériques plutôt défavorables, qui correspondent relativement bien à un ciel très sombre et couvert de nuages denses. Sa luminance, indépendante de l'azimut, est uniquement fonction de l'altitude de l'élément de ciel; cette distribution conduit à une luminance zénithale triple de celle de l'horizon. [Miguet, 2000] [Darula, 2002]

III.3.2. Modèle de ciel de Richard Kittler

Proposé en 1967 et adopté par la CIE en 1973, le modèle de ciel de Richard Kittler était développé à base des quinze types de ciel proposé par la commission internationale de l'éclairage CIE. Cela permettait d'utiliser ce modèle pour la caractérisation l'environnement lumineux extérieur pour différents climats dans des localités arbitraires.

[6] **Rayonnement global** : direct + diffus.

III.3.3. Modèles de ciel de Nakamura et Igawa

Il y a d'autres modèles de ciel dit intermédiaires qui ont été développés à partir des années 1980. L'un d'entre eux est celui proposé par Nakamura en 1985 dans lequel les conditions du ciel ont été classées en trois groupes (couvert, clair et intermédiaire) pour définir la répartition de la luminance. Plus tard, Norio Igawa a proposé en 1997 une vingtaine de modèles de distribution de luminance obtenue par une méthode statistique pour combler le déficit de la distribution de la luminance du ciel relative aux cas extrêmes. [Kittler, 2001]

Ces modèles présentent quelques inconvénients dont le principal est qu'ils ont été développés uniquement pour des types de ciel bien limités. Pour cela, une nouvelle génération de modèles nommée "tout temps" a été introduite vers la fin des années 1980 et début 1990 reprenant les diverses catégories de ciel. Cette nouvelle génération avait comme but la prise en compte du paramètre de la variation continuelle de la quantité de lumière dans la voute céleste. [Miguet, 2000]

III.3.4. Modèle de ciel de Michel Perraudeau

Parmi les modèles représentatifs de cette nouvelle génération de modèles de ciel (tout temps), il y a celui proposé par Michel Perraudeau établi à partir d'une batterie de mesures réalisées au CSTB à Nantes : ce modèle classe les ciels en cinq types comprenant deux modèles similaires aux ciels couvert CIE et ciel serein CIE avec trois ciels intermédiaires. Dans le modèle de Perraudeau, la luminance n'est pas déduite par la luminance zénithale mais par l'éclairement diffus horizontal et elle dépend de l'angle correspondant à l'altitude du point du ciel, l'altitude solaire et la distance entre le soleil et le point du ciel. [Vartiainen, 2000]

III.3.5. Modèle de ciel de Richard Pérez

Après avoir réalisé une première proposition appelée "Perez-ASRC" basée sur une interpolation des modèles spécifiques aux ciels sans nuages, couvert et intermédiaire, Richard Perez établi un second modèle nommé "le modèle tout temps de Perez" ne tenant plus compte des modèles précédents et construit empiriquement à partir de trois millions de points de mesures pour des conditions d'ensoleillement variées sur le site de Berkeley en Californie. [Chain, 2004]. Ce nouveau modèle a l'avantage de pouvoir simuler n'importe quel type de ciel à partir de deux coefficients, le premier est ε servant à traduire le degré de pureté du ciel et Δ représentant la luminosité ou encore l'opacité par rapport à l'épaisseur des nuages présents dans le ciel. [Miguet, 2000]

Remarque :

Il existe plusieurs autres modèles de ciel que nous n'avons pas mentionnés comme à titre d'exemple : pour le ciel couvert, les modèles de Harrison et Coombes, de Brunger et Hooper ; pour les ciels intermédiaires, les modèles de Tregenza, de Pierpoint, de Littlefair. Cela est dû par l'absence de travaux de recherches les concernant.

IV.4. Evaluation de la lumière de jour

IV.4.1. Unité d'évaluation

Avec la multitude des approches concernant sa nature, la manière de sa réception et son traitement neurologique, la lumière naturelle a par contre, des valeurs bien distinctes qui sont exprimées par des unités photométriques (issues de la photométrie). La photométrie est un domaine de la physique appliquée dédiée à la mesure psychophysique de la sensation visuelle produite par le spectre électromagnétique. Elle permet de quantifier les grandeurs relatives au rayonnement lumineux perçu par l'œil humain. 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, la courbe de sensibilité 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 Цm ; en dehors de cet intervalle, les valeurs sont nulles et le maximum de la fonction est situé vers 0,555 Цm en éclairage photopique (diurne) et aux environs de 0,5 Цm en éclairage scotopique (nocturne). [Narboni, 2006] [eduscol.education.fr]

IV.4.1.1. Angle solide

Par analogie à l'angle plan ou bidimensionnel, l'angle solide est le volume défini par l'intersection de trois plans ou plus en un même point. C'est l'angle sous lequel une source située au centre d'une sphère voit une surface, découpée par un cône, de cette sphère. Numériquement, la valeur de l'angle solide égal à 1 Stéradian (sr) quand la valeur de la surface égale 1 mètre-carré et quand la valeur du rayon est égale à 1 mètre. La valeur maximum de Ω s'en déduit lorsque, depuis la source, on intercepte tout l'espace, soit la surface totale de la sphère. [ressources.univ-lemans.fr]

IV.4.1.2. Intensité lumineuse (I)

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 le quotient entre le flux lumineux élémentaire quittant une source

lumineuse et l'angle solide élémentaire dans lequel il se propage. Elle est utilisée pour les calculs d'éclairement 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 540.10^{12} Hz et dont l'intensité énergétique est de 1/683 $W.sr^{-1}$. L'instrument utilisé pour sa mesure est les récepteurs photométriques.

IV.4.1.3. Flux lumineux (F)

Le flux lumineux est la grandeur visuelle correspondant à la quantité de lumière totale fournie par une source lumineuse dans tout l'espace environnant. 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. 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.

IV.4.1.4. Eclairement (E)

L'éclairement d'une surface donnée est le quotient du flux lumineux sur la surface par l'aire de cette dernière ; son niveau mesure donc la densité de lumière reçue, soit par un point (éclairement ponctuel) ou par une surface (éclairement d'une surface), cela d'une manière horizontale ou verticale. La mesure de l'éclairement dépend donc de la densité de la lumière émise par la source, de la distance entre la source lumineuse et la surface éclairée et de l'inclinaison de la surface ; elle permet une appréciation objective de l'ambiance lumineuse d'un espace (sombre, faiblement éclairé, fortement éclairé, surexposé) et aide ainsi à faire une comparaison entre espaces éclairés entre eux. L'éclairement est exprimé en lux (lx) ; le lux est l'éclairement d'une surface qui reçoit un flux lumineux de 1lumen par mètre-carré, d'une manière uniformément répartie. L'instrument permettant sa mesure est le luxmètre.

IV.4.1.5. Luminance (L)

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 1mètre carré et dont l'intensité est de 1 candela. L'instrument permettant de la mesurer est le luminance-mètre.

IV.4.1.6. Facteur de lumière du jour (FLJ)

Vu la variation importante de la qualité de la lumière naturelle pendant la journée, un rapport de proportionnalité entre l'éclairement extérieur et celui disponible à l'intérieur d'un espace a été introduit afin de répondre aux exigences d'éclairement. Ce rapport est appelé le facteur de lumière du jour (FLJ) ; c'est le quotient de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point (généralement le plan utile ou le niveau du sol) par l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé par ciel couvert. 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.

IV.4.2. Evaluation qualitative

Dans un espace donné, chaque personne, par son environnement, son éducation et sa culture, ne perçoit pas les mêmes sensations et n'utilise pas forcément les mêmes mots pour décrire une sa réaction envers la même quantité de lumière présente dans cet espace. Malgré cette situation contradictoire, une étude menée par Ljubica Mudri a montrée l'existence d'un lien entre les approches quantitatives obtenue par différentes mesures physiques et les approches qualitatives de la lumière naturelle dans un espace intérieur.

A travers une analyse approfondie sur des notions comme le rythme donné à un espace par la lumière, les répétitions, les divers niveaux de contraste, l'importance de la taille des surfaces qui réfléchissent plus ou moins bien la lumière incidente, L. Mudri fini par un classement plus au moins précis des ambiances lumineuses basé sur un langage de description. Le lien entre une approche qualitative et quantitative a permis de définir qualitativement des effets en expliquant clairement le poids des mots utilisés. [Mudri, 1995]

Cette étude a aussi permis de donner des seuils quantitatifs aux expressions qualitatives et ainsi de rendre plus compréhensible, d'un point de vue technique, les attentes du concepteur. Le lien entre une approche qualitative et quantitative a permis de définir qualitativement des effets en expliquant clairement le poids des mots utilisés. L'approche quantitative est moins abordable en phase esquisse. [Cervantès, 2012]

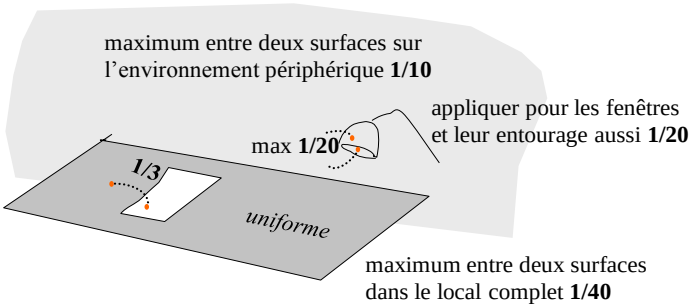


Fig (19) : Les valeurs recommandées pour le contraste.

CONCLUSION

A travers ce que nous avons constaté lors des travaux précédemment présentés, nous constatons que, d'une part, la conception architecturale peut être perçue comme un domaine très vaste contenant de multiples facettes et que d'autre part, chacune des contributions étudiées peut être un objet d'étude d'un nombre important de recherches.

Malgré l'hétérogénéité de la culture et des domaines des divers auteurs, des similitudes peuvent être ressenties dans leurs contributions ; la majorité d'entre eux présentaient la conception comme un processus de formulation/résolution des problèmes parmi lesquels figure, dans notre cas, le problème de conception des ambiances lumineuses et précisément celui de l'éclairage naturel à l'intérieur de l'espace architectural bâti.

Vu le rôle important que joue cet élément dans la perception des espaces, d'abord dans la révélation des compositions, des formes, des surfaces, des matériaux et des couleurs dans le projet architectural et puis, dans la garantie du confort visuel, thermique et psychique, l'étude et la compréhension de la lumière naturelle apparait comme évidente. Le témoignage de cette importance a été montré par la prise en compte de la lumière naturelle par les architectes durant la phase de mise en forme de leurs projets. Cela montre qu'au cours de la conception, l'architecte est en possession d'un outil, le bâtiment, lui permettant de maitriser les phénomènes physiques et ainsi modéliser l'éclairage naturel à l'intérieur. Le bâtiment ou le projet architectural est donc un filtre de la lumière naturelle par son interaction avec les phénomènes physiques.

Le place qu'occupe la lumière naturelle dans le projet architectural ne se limite pas au niveau tangible de la conception car, dans plusieurs cas, la lumière dépasse ce stade pour gagner une valeur sémiotique lui permettant de caractériser un espace architectural par des sens allant du simple marquage de l'histoire jusqu'aux grandes valeurs religieuses représentant la croyance de tout un peuple ou une région. Pour cela et idéalement, la lumière naturelle et les lois de la perception deviennent l'un des principaux facteurs pouvant déterminer la forme et l'identité des espaces architecturaux dans un processus de conception parfaitement intégré.

Chapitre II :

Simulation classique et simulation inverse de l'ensoleillement dans le projet architectural

" Nous ne pouvons pas toujours changer le monde, mais nous pouvons changer d'idée."

Gérald JAMPOLSKY

INTRODUCTION

Dans la communauté des profanes, la profession d'architecte a été souvent pensée comme une action de production de dessins par les outils graphiques traditionnels sur une table de dessin. Cela représente en quelque sorte l'image mentale que la majorité des profanes avaient et ont souvent aujourd'hui encore sur les outils qu'utilise tout architecte en train de concevoir/dessiner un projet. Aujourd'hui, avec leur évolution continue en quantité et en caractéristiques et avec leur apport indéniable en matière de facilité de travail, en possibilité de représentation et gain de temps, les logiciels informatiques sont de plus en plus utilisés par les architectes durant leur mission de conception, ce qui a contribué à introduire un changement dans le rapport entre "architecte et outils graphiques", ceci, devenant des intermédiaires supplémentaires dans cette relation.

Conséquence de cette situation, quelques questionnements sont posés sur le vrai rôle de ces logiciels dans l'aide à la conception, précisément ceux utilisés pour la simulation de l'ensoleillement dans le projet architectural car ces derniers ont montré plusieurs limites par rapport au rôle souhaité; cela est dû au fait que la plupart de ces outils sont basés sur des méthodes dites « de simulation directe » qui agissent en aval par rapport aux étapes de conception. Face à ça, une autre méthode, basée sur l'inversion du fonctionnement des méthodes de simulation a été développée. La réversibilité de cette nouvelle méthode doit permettre d'obtenir les conditions pour lesquelles ces propriétés peuvent être réalisées. Lorsque ces propriétés se démarquent comme intentions du projet, les conditions de leur réalisation deviennent des contraintes de conception et participent à la mise en forme conjointe des ambiances et de l'architecture.

Dans le présent chapitre, nous tenterons dans un premier temps, de définir quelques termes en relation avec le domaine de la Conception Assistée par Ordinateur "CAO". Dans un deuxième temps, réaliser un état de l'art des différents logiciels de simulation directe de l'ensoleillement pour en dégager un schéma représentant les étapes à suivre pour les utiliser. D'un autre côté, on va aborder l'approche inverse comme méthode répondant le mieux aux caractéristiques de la conception architecturale et permettant la prise en compte de la lumière naturelle dès les prémisses de cette dernière.

I. Etat de l'art des logiciels de simulation directe de l'ensoleillement

I.1. Conception Assistée par Ordinateur

On fait usuellement remonter l'apparition de la Conception Assistée par Ordinateur aux trois communications présentées par S.A Loors, D.T Ross et T.E Jonhnson à la Sprint Joint conference, organisée par l'AFIPS (American Federation of Information Processing Society en 1963). Désignée sous le sigle CAO, la Conception Assistée par Ordinateur regroupe l'ensemble des techniques de modélisation géométrique servant à la création de données décrivant un objet à concevoir, la manipulation des données en vue d'aboutir à une forme achevée de conception et la généralisation d'informations nécessaires à la fabrication de cet objet [Morineau, 2002]. La CAO permet l'appréciation globale du comportement de l'objet créé avant même que celui-ci existe ; cela est assuré par une "maquette numérique" qui est le résultat du travail et qui constitue un véritable prototype évolutif.

I.1.1. Logiciel informatique

C'est un terme inventé en 1967 par Philippe Renard pour remplacer le terme anglais "Software". C'est la partie immatérielle d'un système informatique incluant un ensemble d'instructions, de programmes, de procédés, de règles ainsi que de documentation qui leurs sont éventuellement associés, relatifs au fonctionnement d'un ordinateur ou au traitement de données. Suivant leur taille, les logiciels peuvent être développés par une seule personne appelée "programmeur", une petite équipe ou un ensemble d'équipes de programmeurs coordonnées. Par rapport à sa relation avec l'utilisateur, un logiciel est constitué d'une partie cachée ayant pour mission "le calcul" et une partie apparente en relation directe avec l'homme appelée "interface utilisateur". [Mammeri, 2002]

I.1.2. Simulation Numérique

C'est l'un des outils utilisés par les êtres humains et qui consiste à simuler (faire paraitre comme réelle une chose qui ne l'est pas) un système/phénomène donné afin d'étudier son fonctionnement, ses propriétés et de prédire ainsi son évolution. La simulation numérique repose sur la programmation de modèles théoriques ou mathématiques adaptés aux moyens numériques. [Gaillard, 2002] C'est donc une série de calculs utilisant souvent la technique

dite des éléments finis effectuée sur un support matériel "ordinateur" dont les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats par des "images de synthèse"[1].

"La notion de simulation fait partie intégrante de la conception architecturale depuis sa création" [Lebahar, 1983] ; la simulation de l'éclairage naturel se fait par la simulation de la position du soleil et de la luminance du ciel et l'ajout des dimensions temporelle et géographique. [Miguet, 2000] [Fontoynont, 1998]

I.1.3. Logiciels de Simulation directe de l'ensoleillement

La complexité croissante des méthodes de calcul ainsi que la rapide chute des prix des ordinateurs sont autant de facteurs qui ont favorisé une utilisation généralisée de l'informatique dans tous les domaines des sciences de l'ingénieur, y compris l'architecture et l'éclairagisme.

Les logiciels de simulation informatique de l'éclairage ont connu et connaissent encore une évolution très rapide. Ces logiciels de modélisation numérique permettent de réaliser une simulation de la propagation de la lumière naturelle dans un espace architectural. Cela donne la possibilité de faire une estimation plus ou moins précise du potentiel d'économie d'énergie pour différents systèmes de gestion de l'éclairage adoptés dans un projet architectural. La qualité d'une modélisation numérique dépend de différents éléments : la modélisation du ciel, la caractérisation photométrique des matériaux, la méthode de calcul utilisée et la maitrise du logiciel par l'utilisateur. [Deroisy, 2011] Les logiciels existants se diffèrent entre eux par les algorithmes qu'ils utilisent, par leurs approches DAO, par la mise en considération des différents types de sources lumineuses, par leur capacité à simuler les phénomènes de propagation de lumière plus ou moins complexes, par leur interface utilisateur ainsi que par leurs vocations et leurs domaines d'application. [Maamari, 2005]

Le principe de calcul des logiciels de simulation informatique de l'éclairage est basé sur deux méthodes : la première est **la Radiosité**, qui repose sur une méthode de simulation par éléments finis, une méthode dans laquelle un traitement des échanges radiatifs entre surfaces parfaitement diffusantes formant un espace clos est effectué. [Deroisy, 2011] Son principe de base consiste à discrétiser chaque surface de l'espace étudié en plusieurs facettes "mailles" pour lesquelles des bilans de flux de rayonnement émis et réfléchi sont établis. Tout d'abord,

[1] **Image de synthèse :** Image artificielle, animée ou non, fabriquée par des moyens optiques, électroniques ou informatiques. [larousse.fr]

un calcul de la lumière reçue par chaque maille est effectué, ensuite chaque maille est traitée comme source lumineuse émettant une partie du flux lumineux qu'elle a reçu (selon son facteur de réflexion) vers les autres mailles de la géométrie. Cette lumière indirecte subit plusieurs inter-réflexions jusqu'à ce que la quasi-totalité du flux initial soit absorbée. Suite à ce calcul, il est possible de connaitre la quantité de flux lumineux direct et indirect reçu et émis par une maille donnée et donc l'éclairement et la luminance de cette maille. [Scartezzini, 1993] [Ashdown, 2001].

La deuxième méthode est de **Lancer de rayons** : A l' origine, les méthodes de simulation par lancer de rayons ont été développées pour la création d'images de synthèse. [Compagnon, 1994] Le lancer de rayons se base sur un algorithme dit récursif : dans lequel un rayon est envoyé depuis le point d'observation à chaque pixel de l'écran/scène/surface du modèle représentant la scène. Dès que la première surface est atteinte, le rayon est soit réfléchi, soit réfracté ou transmis selon la nature de la surface ; à la suite de cela, des rayons sont envoyés vers les sources lumineuses afin de déterminer la position du point d'impact. [Minh, 2005] Les algorithmes de lancer de rayons se basent sur une méthode de calcul des trajectoires d'un nombre important de rayons lumineux dans une scène. [Deroisy, 2011] Pour ce principe de base, deux approches sont possibles : les rayons lumineux sont suivis depuis la source vers les surfaces réceptrices : quand un rayon atteint une surface, il est dirigé selon la photométrie rencontrée jusqu'à l'épuisement de son énergie. (forward raytracing ou lancer de rayons direct). [Fontoynont, 1991] ou bien les rayons sont générés depuis l'œil de l'observateur et cheminent à travers des réflexions multiples sur les parois jusqu'aux sources de lumière (backward raytracing ou lancer de rayons inverse). [Whitted, 1980]

I.2. Validation d'un Logiciel de Simulation de l'Eclairage

C'est une opération destinée à tester le niveau de précision et de similitude entre les résultats d'une simulation exigée ou souhaitée d'une propagation d'une lumière donnée par ce logiciel et la propagation réelle de cette lumière. C'est une opération plus ou moins complexe vis-à-vis de la diversité des logiciels de simulation de l'éclairage ainsi que de la multitude des aspects qui entrent en jeu dans chacun des phénomènes de propagation de la lumière. L'objectif principal de cette opération est la sensibilisation des utilisateurs afin d'améliorer leur confiance à travers l'identification des points de faiblesse de ces logiciels, leurs limites et leur domaine précis d'application, le tout dans le but d'arriver à une utilisation responsable de ces outils informatiques. Il existe plusieurs types de validation : parmi eux, on peut citer :

I.2.1. La validation analytique

Ce premier type est appelé "analytique" car il porte sur des cas théoriques pour lesquels il existe des lois analytiques issues des notions de base de la science physique liée au rayonnement électromagnétique. Parmi les avantages de la validation analytique, c'est qu'elle permet de limiter les paramètres liés à la propagation de la lumière qui entrent en jeu dans un scénario test et qu'elle permet aussi de donner des solutions de référence avec des incertitudes nulles ou parfois négligeables. En contrepartie, la validation analytique ne peut pas couvrir tous les domaines de la propagation de la lumière ; elle est utilisée en général pour des cas de figures simples pour lesquels il existe une loi théorique. [Maamari, 2004]

I.2.2. La validation expérimentale

Dans ce deuxième type de validation, les références sont issues d'une série d'expériences. Cela veut dire que les résultats des logiciels sont comparés à des mesures expérimentales. Ces dernières peuvent être réalisées dans des pièces réelles, des cellules tests à échelle 1/1 ou des maquettes d'études à échelle réduite.

Malgré le réalisme qui caractérise ces références expérimentales adoptées par la validation expérimentale, cette dernière est confrontée à des obstacles considérables, liés d'un côté aux sources d'erreur introduites lors de la description du scénario expérimental afin de le reproduire dans une simulation numérique et dans un autre côté, à l'incertitude qui existe dans la valeur mesurée quel que soit la précision du protocole expérimental appliqué. Avec cette forte dépendance aux moyens techniques, financiers et humains nécessaires à la création des références, le jugement sur le degré de précision des conclusions des logiciels testés est difficile. [Maamari, 2004]

I.2.3. La validation comparative

Ce troisième type de validation porte quant à lui sur une comparaison des résultats de simulation de plusieurs logiciels entre eux avec l'existence ou non d'une référence expérimentale ou analytique. L'avantage des comparaisons est de donner la possibilité aux utilisateurs de mieux choisir entre plusieurs logiciels selon leur performance dans un domaine donné de la simulation. Cependant, l'utilisation des résultats d'une comparaison afin de juger des logiciels les uns par rapport aux autres nécessite un maximum de transparence, en particulier sur la complexité des procédures et sur le temps de calcul nécessaire pour l'obtention de ces résultats. [Maamari, 2004]

I.3. Exemple de Logiciels de Simulation d'Eclairage Naturel

I.3.1. ADELINE

ADELINE est un outil informatique de conception d'éclairage intégré mis au point par une équipe internationale de recherche dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) dans le but de fournir aux architectes et aux ingénieurs des informations précises sur le comportement et la performance des systèmes d'éclairage. Dans une démarche consistant à profiter des développements antérieurs pour l'élaboration de logiciels plus puissants, ADELINE a mis au point d'un côté, les programmes Superlite et Radiance pour les tâches de simulation d'éclairage et d'un autre côté, les programmes SuperLink et Radlink pour le calcul de l'interaction entre la lumière du jour, l'éclairage artificiel et le renforcement des performances thermiques. [Compagnon, 1994] Avec la variété de ses sous-programmes constitutifs et dans le but de l'adapter aux premières phases de conception, ADELINE peut être appliqué à la fois pour l'étude des espaces simples ainsi que pour les bâtiments de grande complexité. Cela lui permet aussi d'effectuer des conceptions sur des modèles de différents types de bâtiments afin de faire une première et rapide évaluation des différents choix possibles sans trop s'investir dans un travail de modélisation complexe. De même, pour aider les concepteurs à prendre une décision par rapport à un ensemble de solutions, une fonction permet de faire une comparaison entre deux configurations possibles. [Gallas, 2009]

I.3.2. DIALux

Le logiciel DIALux est l'un des produits de "DIAL GMBH" entreprise allemande fondée en 1989 dans le but de mettre à disposition le savoir-faire atteint en matière de techniques d'éclairage pour que ce dernier puisse faire l'objet d'une application ciblée. [www.dial.de] De son côté, DIALux est apparu pour la première fois en 1994 lors de la création d'un consortium industriel en vue du développement d'un outil de planification de l'éclairage. La version la plus récente est celle nommée "DIALux evo 1" (cette version de DIALux Evo est sortie au printemps 2012 ; elle permet de traiter plusieurs volumes de scènes intérieures et extérieures simultanément, mais elle est destinée seulement à l'étude de l'éclairage artificiel). Pour cela, notre choix de version représentative est "DIALux 4.11.0.2".

I.3.3. ECOTECT

Ecotect est un logiciel de simulation développé pour la première fois par Andrew Marsh et récemment approprié par la société américaine Autodesk. [Ibarra, 2010] Ecotect a été conçu

avec comme principe que la conception environnementale la plus efficace est à valider pendant les premières étapes conceptuelles du design. [Gallas, 2009] En plus des différentes possibilités de calcul qu'il offre pour les analyses énergétiques, performance thermique, consommation d'eau et évaluation des coûts, Ecotect permet aussi d'avoir une idée précise sur le rayonnement solaire (en visualisant le rayonnement solaire sur les fenêtres et les autres surfaces, à n'importe quelle période de l'année), sur l'éclairage naturel (en calculant les valeurs des facteurs d'éclairage naturels et les niveaux d'éclairement à n'importe quel point du modèle) et aussi sur les ombres et réflexions (en affichant la position et le parcours du soleil par rapport au modèle à la date, à l'heure et à l'emplacement choisis). [autodesk.fr]

I.3.4. GENELUX

GENELUX est un autre environnement de simulation numérique de la lumière dans un espace urbain ou architectural. Développé principalement au laboratoire des sciences de l'habitat, ce logiciel utilise un algorithme de lancer direct et suivi de rayons lumineux (forward Ray Tracing) pour le calcul de la lumière provenant du soleil, du ciel et des lampes. Cet outil prend en compte la coloration de la lumière par les matériaux ainsi que la dispersion plus ou moins importante de la lumière occasionnée par un revêtement ou un vitrage. [Adolphe, 1998] [Maamari, 2004] La distribution des rayons réfléchis est effectuée en ayant recours à la technique statistique de Monte Carlo. Dans le cas où les surfaces seraient parfaitement diffusantes, il est possible de faire appel à un algorithme basé sur la méthode de radiosité afin de réduire les temps de simulation. [Mitanchey, 1996] [Maamari, 2003] Le programme fournit des cartes d'éclairement et de luminances pour un observateur donné situé à l'intérieur d'un local. D'autres outils périphériques permettent d'aborder des problèmes associés aux gisements lumineux et à la gestion des bases de données photométriques.

I.3.5. INSPIRER

INSPIRER est un logiciel de simulation utilisé dans quelques domaines de la conception, comme l'aérospatiale, l'automobile, l'éclairagisme mais spécialement dans le domaine de l'architecture. Cet outil permet la reproduction virtuelle de l'éclairage extérieur et intérieur ainsi que l'analyse de l'apparence de l'objet dans l'éclairage extérieur. INSPIRER utilise des approches hybrides, surtout la méthode bi-directionnelle de Monte Carlo au Lancer de Rayons. Ce qui différencie le plus ce logiciel est l'utilisation des formules de BRDF[2] qui

[2] **BRDF** : abréviation de « Bidirectional Reflectance Distribution Function ». [Rusinkiewicz, 2002]

permet de respecter les variations de réflexion et de transmission (diffuse et spéculaire) ainsi que des couleurs, selon l'angle d'incidence et de vision. [Maamari, 2004]

I.3.7. LesoDial / DIAL-Europe

LesoDial est un logiciel développé dans le cadre d'un travail de thèse en 1995 par le Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment "LESO-PB" et Financé par l'Office Fédéral de l'Energie et l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne "EPFL". Le but de cet outil était de permettre aux architectes d'avoir des informations utiles concernant l'utilisation de la lumière naturelle dans un espace architectural dès les premières phases de leur conception. [B. Paul et al. 1995]. Grâce, d'un côté, à une utilisation d'algorithmes de logique floue[3] et d'un autre côté, à une utilisation hybride de formule analytique et empirique, le logiciel LesoDial offre la possibilité de donner les valeurs du facteur de lumière du jour "FLJ" sur le plan utile dans l'espace étudié même si certains des paramètres qui permettent de décrire cet espace ne sont pas connus de manière précise. [Paule, 1995] [Maamari, 2004] Le logiciel LesoDial est adapté seulement au climat de l'Europe du Centre (base de données climat suisse). Pour cela et dans le but de généraliser l'utilisation de cet outil, un projet européen "DIAL-Europe" a débuté au 1er avril 2000 avec comme objectif de rendre LesoDial plus "Européen" et d'étendre ses capacités d'analyse.

I.3.8. LIGHTSCAPE

Lightscape est un logiciel de simulation et de visualisation en éclairage conçu par la société américaine Autodesk. Il utilise un algorithme de radiosité pour le calcul quantitatif de la propagation de la lumière entre les sources naturelles ou artificielles et les surfaces du volume tridimensionnel de l'espace étudié, puis pour le calcul des inter-réflexions diffuses entre ces différentes surfaces. Une fois le calcul terminé, le résultat peut ainsi être visualisé sous n'importe quel angle de vue et des valeurs quantitatives peuvent être obtenues pour n'importe quelle surface de la géométrie. Ensuite, Lightscape offre la possibilité d'améliorer le résultat graphique à l'aide d'un algorithme de lancer de rayons qui permet de prendre en considération les réflexions spéculaires. Contrairement au calcul de radiosité, le résultat du lancer de rayons est enregistré sous forme d'une image de synthèse bidimensionnelle correspondant à un point de vue donné. La procédure de lancer de rayons n'affecte donc pas les résultats quantitatifs obtenus suite au calcul de radiosité. [Maamari, 2004]

[3] **Logique floue** : logique de raisonnement approché sur des données imprécises [Paule, 1999]

I.3.9. RADIANCE

RADIANCE est un ensemble de programmes pour l'analyse et la visualisation de l'éclairage dans la conception ; il a été principalement développé par Greg Ward Larson entre 1985 et 1997 au Lawrence Berkeley National Laboratory à Berkeley, en Californie. Depuis son apparition, cet outil est utilisé par les designers et les chercheurs dans les universités et les entreprises privées aux Etats-Unis comme dans d'autres pays. [Chadwell, 1997] RADIANCE utilise la technique du lancer de rayons munie de plusieurs extentions originales qui le rendent apte à simuler des systèmes d'éclairage naturel complexes. [R. Compagnon, 1994] Le calcul peut être divisé en trois parties principales: la composante directe, la composante spéculaire indirecte et la composante diffuse indirecte. [radsite.lbl.gov]

I.3.9. SUPERLITE

Le programme SUPERLITE a été conçu au début des années 1980 sur la base de Recherche Spatiales Américaines (problème de l'éclairement d'un laboratoire spatial par le soleil) et il a été ensuite adapté au calcul de l'éclairage naturel dans l'espace architectural. [Compagnon, 1994] Le logiciel SUPERLITE utilise une méthode point à point de radiosité. Toutes les surfaces sont supposées être parfaitement diffusantes. [Maamari, 2003] C'est un outil destiné à être utilisé par les architectes comme par les concepteurs d'éclairage, les chercheurs et les ingénieurs. [energy.gov]

I.3.10. VELUX DAYLIGHT VISUALIZER

VELUX Daylight Visualizer est un logiciel gratuit de simulation d'éclairage naturel développé par la société LUXION pour le groupe VELUX. [luxion.com] Grâce à une technique combinant le lancer de rayons inverse et le photon mapping, le logiciel VELUX Daylight Visualizer permet aux professionnels de prédire les niveaux d'éclairement et l'apparence des espaces. [Haubruge, 2012] Ces calculs ont été validés par un rapport de la Commission Internationale de l'Eclairage CIE[4] [CIE 171 : 2006] La version la plus récente de ce logiciel est celle nommée « VELUX Daylight Visualizer 2.6.0 » sortie en décembre 2011[VELUX.fr]

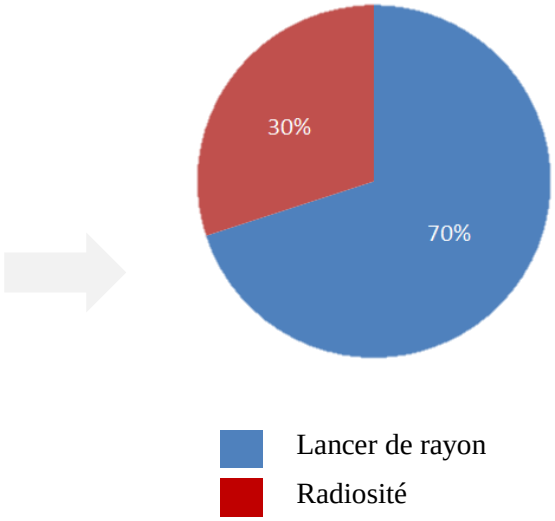
[4] Le document original **CIE** de la présente étude est fondée sur: CIE 171:2006 rapport, 2006, ISBN 978 3 901 906 47 3

I.3.9. Synthèse comparative des logiciels de simulations directe de l'ensoleillement

Le but de cette comparaison n'est pas de montrer les spécificités de chaque logiciel par rapport aux autres mais d'en tirer l'essentiel par rapport à notre thème de recherche. Pour cela, nous avons choisi comme paramètre de comparaison « la méthode de calcul ». Cette dernière nous permettra de d'avoir une idée sur la phase pendant laquelle chaque logiciel peut être introduit/utilisé.

Logiciel	Méthode de calcul
ADELINE	Radiosité
DIALux	Lancer de rayon
ECOTECT	Radiosité
GENELUX	Lancer de rayon
INSPIRER	Lancer de rayon
LesoDial	Lancer de rayon
LIGHTSCAPE	Lancer de rayon
RADIANCE	Lancer de rayon
SUPERLITE	Radiosité
VELUX	Lancer de rayon

Tab (2) : Méthodes de calcul utilisées pour chaque logiciel.



Gra (1): le pourcentage de chaque méthode.

Interprétation :

Tous les logiciels étudiés adoptent, soit la méthode de Radiosité, soit celle du Lancer de rayon avec une large dominance de la méthode du Lancer de rayon.

Comme précédemment montré, ces deux méthodes nécessitent un maximum de détails sur l'espace en cours de conception (précisément sa géométrie complète dans les trois dimensions) pour pouvoir ensuite tester les choix du concepteur. Cela nous amène à conclure que la prétendue volonté d'intégration de ces logiciels aux premières phases de conception semble loin d'être définie. 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]

I.4. Exemple de travail avec les logiciels de simulation de l'éclairage naturel

I.4.1. Présentation du modèle d'espace pour la simulation directe

Le modèle d'espace sur lequel le travail avec les différents logiciels sera fait sera "rectangulaire", forme géométrique simple qui facilite la lecture de l'orientation avec des dimensions courantes de "4m x 6m x 3m" pour s'approcher le plus du cas de conception réelle. Cet espace est équipé dans sa façade Est d'une fenêtre également de forme simple et de dimensions courantes "rectangle de 1,2 m x 1 m x 0,8 m" placé au centre de la façade. Ce modèle a été réalisé avec Autodesk Autocad 2012 et enregistré sous format DWG et DXF pour pouvoir l'utiliser dans le cas où le logiciel de simulation de l'éclairage ne dispose pas de possibilité de modélisation géométrique.

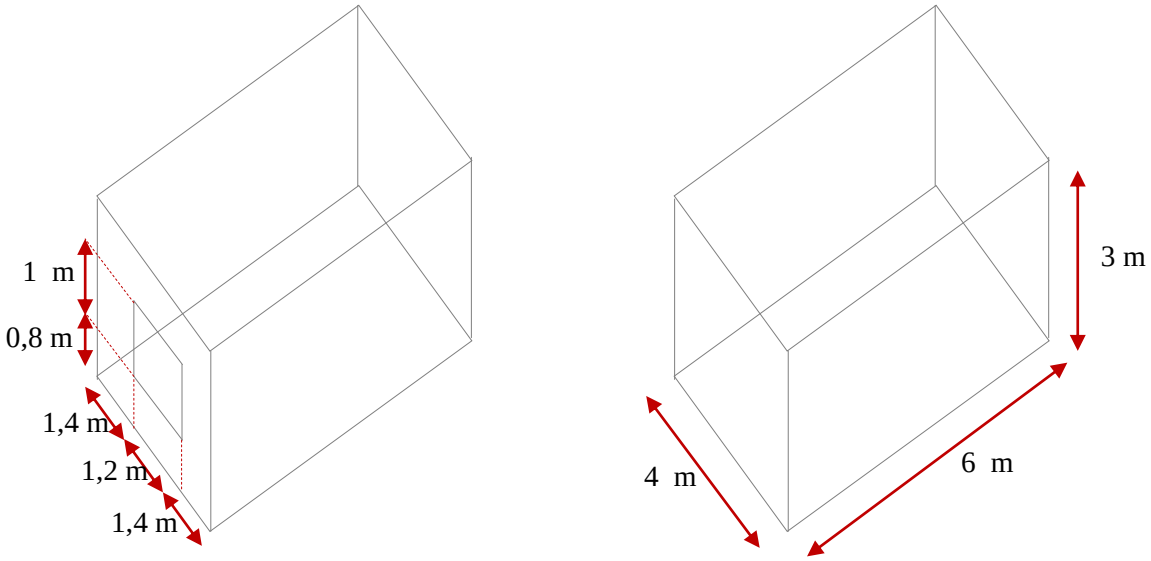


Fig (20) : Description du modèle choisi pour la simulation.
(Dimension de local et emplacement de l'ouverture)

Le choix des caractéristiques photométriques des matériaux/textures revêtant les composantes internes de l'espace (sol, murs et plafond) n'est pas fixé à ce stade. Les choix vont être faits depuis ceux contenus dans la liste des matériaux de la bibliothèque intégrée de chaque logiciel. Cela, car le but est d'avoir une idée sur les étapes de travail et les possibilités de simulation offertes.

I.4. 2. Les étapes du travail avec DIALux 4.11.0.2

Au démarrage, deux possibilités s'offrent à l'utilisateur : créer un nouveau projet, donc faire de la modélisation géométrique ou importer des fichiers réalisés par d'autres logiciels. Ensuite, le logiciel demande les indications des dimensions de la pièce souhaités. L'étape qui suit consiste en l'insertion des ouvertures (portes et fenêtres) ainsi que d'éléments de décoration intérieurs ou extérieurs. La prochaine étape est le choix de la texture ; il s'agit de choisir des textures pour les trois composantes de l'espace parmi celles disponibles dans la bibliothèque intégrée dans le logiciel ou en important d'autres textures mais en indiquant leurs degré de réflexion. A la fin, le logiciel demande d'éditer la localisation et le choix se fait entre les villes et endroits intégrés dans la base de données du logiciel en indiquant les coordonnées géographiques souhaitées. La dernière étape est la visualisation des résultats du calcul : ils peuvent être représentés selon plusieurs versions : Synthèse d'image (photoréalisme), représentation fausses-couleurs, les courbes isométriques, …

I.4. 3. Les étapes du travail avec "ECOTECT V 5.50"

Ce logiciel a deux possibilités de téléchargement (version d'essai ou téléchargement gratuit pour les étudiants. Dans la page démarrage, il est indiqué le nom et le type de la version, une présentation du logiciel ainsi qu'une idée générale sur ses fonctionnalités. Dans la première phase de travail, des informations sur le projet sont à indiquer dans la page projet. Ensuite, on doit suivre les étapes suivantes :

3D Editor : Dans cette phase, il est possible de tracer et des espaces, voire des bâtiments de manière créative ou en se basant sur des fichiers importés depuis d'autres logiciels.

L'ajout des ouvertures : La possibilité de manipulation de l'emplacement de l'ouverture dans la fenêtre 3d pendant et après l'ajout de cette même ouverture.

Visualisation : Après avoir terminé la modélisation géométrique, la possibilité de visualisation de l'ensemble du travail fait depuis l'intérieur ou l'extérieur permet d'avoir une idée sur le degré de satisfaction de ce qui est fait.

Réglages avant le calcul : Il s'agit de cocher ce qui est à prendre en compte lors du calcul et de préciser la surface sur laquelle sera concentré le calcul.

La dernière étape est la visualisation des résultats du calcul : dans cette page, il est possible de voir l'espace de l'extérieur avec son orientation par rapport à la course apparente du soleil ou

bien de l'intérieur avec les courbes isométriques et le rendu fausses-couleurs ainsi que la tache solaire correspondant à la date et heure indiquées.

N.B : les illustrations montrant de manière concrète les différentes étapes de travail avec DIALux 4.11.0.2 et ECOTECT V 5.50 sont présentes dans l'annexe.

I.4. 4. Comparaison entre DIALux 4.11.0.2 et ECOTECT V 5.50

Après avoir fait l'expérience sur deux logiciels appartenant à la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et qui ont comme fonction la simulation de l'éclairage naturel dans l'espace architectural, les étapes de conception de ce dernier (qui peuvent être généralisées à tout projet architectural) répondent au schéma suivant :

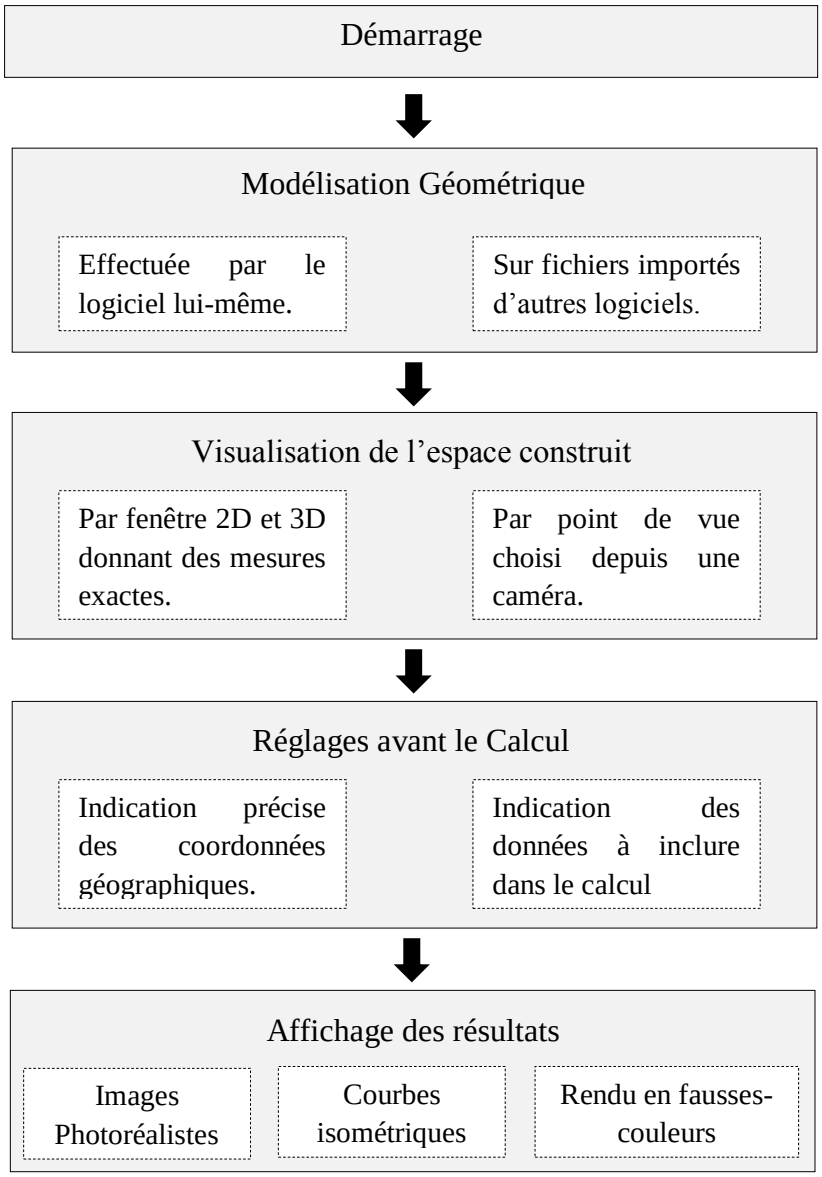


Fig (21) : Schéma représentant les étapes de travail de simulation avec les logiciels DIALux et Ecotect.

I.4. 5. Proposition d'un diagramme de simulation de l'éclairage

Dans le but de représenter le processus de conception par un outil appartenant à la CAO et permettant la simulation de l'éclairage naturel dans le projet architectural, le schéma précédemment réalisé suit le diagramme suivant :

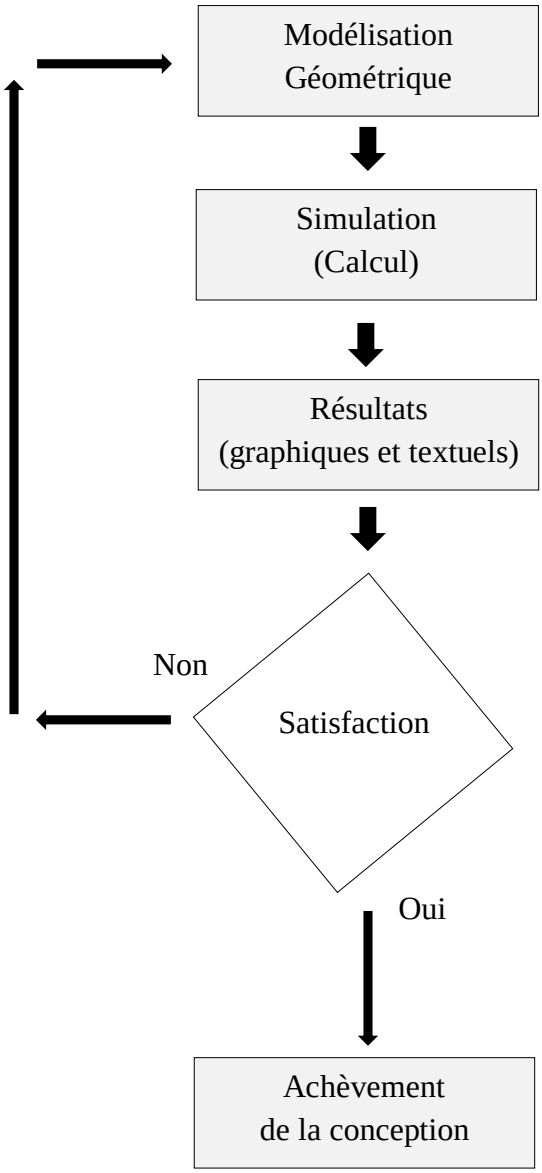


Fig (22) : Schéma représentant les étapes de travail avec les logiciels de simulation directe de l'éclairage naturel.

II. L'approche inverse comme solution au problème de conception d'éclairage

N.B : Cette partie du mémoire est construite sur la base d'un nombre réduit de références ; cela est dû au manque de travaux de recherche sur ce sujet ainsi que par la spécificité de cette approche qui réduit les composantes à la fois du projet architectural et de l'éclairage pour en proposer un modèle approprié.

II.1. Modélisation déclarative

II.1.1. Présentation

La simulation inverse s'inscrit dans une approche plus globale appelée modélisation déclarative qui peut être définie comme suit : « 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 ». [Hegron] « 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]

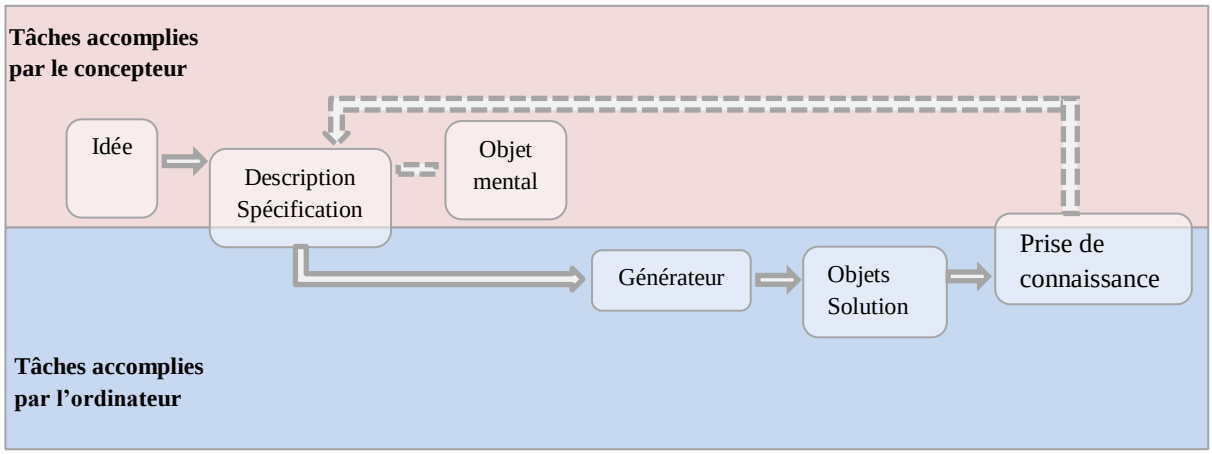


Fig (23) : Répartition des tâches dans une modélisation déclarative.

Cette méthode propose une approche d'une part "implicite", puisque le mode de construction géométrique de l'objet dépend du contexte d'utilisation et donc, il n'est pas donné à priori et d'autre part, "abstraite", puisque l'objet est défini par des propriétés conceptuelles plutôt que par son aspect matériel réaliste. [Siret, 1997]

II.1.2. Avantages de la modélisation déclarative

Selon Pierre-François Bonnefoi (1999), la modélisation déclarative dispose de quatre avantages sur la modélisation impérative[5] :

- 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 modeleur 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 permi 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]

[5] **Modélisation impérative :** appelée aussi modélisation conventionnelle et classique ; c'est une modélisation basée sur des méthodes directes de simulation.

II.1.3. Etapes de la modélisation déclarative

Le processus de modélisation déclarative, avec tous les avantages qu'il possède, est composé de trois phases successives ; la connaissance de ces phases permet de mieux comprendre le mécanisme du modeleur déclaratif :

II.1.3.1. Phase de description

En se basant sur une image mentale d'une scène qu'il veut reproduire, le concepteur élabore une description souvent vague, ambigüe, imprécise et contenant des contradictions et la transmet ensuite en entrée au modeleur déclaratif. Ce dernier compose cette description à l'aide d'outils propres et en réalisant plusieurs opérations: mise à disposition des concepts manipulables, combinaison de ces concepts entre eux, application de propriétés et autres opérations dont il est équipé. [Bonnefoi, 1999] Les moyens de description passent par le vocabulaire propre à un domaine particulier. L'objectif n'est pas de comprendre le langage naturel dans toute sa complexité : ceux propres aux domaines utilisés par les experts et d'autres, plus généraux, communs à toutes les applications, liés à la nature spatiale de l'objet : grand, léger [Gallas, 2009] Ainsi, différentes autres méthodes sont possibles comme l'utilisation d'une interface graphique ou bien la composition d'un texte en un langage plus ou moins naturel. Cette description est ensuite traduite en un modèle interne par le modeleur déclaratif qui l'utilise pour engendrer les scènes correspondantes. [Bonnefoi, 1999]

II.1.3.2. Phase de génération

Cette étape est assurée par le modeleur déclaratif qui manipule ses propres raisonnements et modèles internes pour générer/produire un ensemble de modèles numériques faisant partie de l'espace des solutions vérifiant toutes les propriétés exprimées par l'utilisateur.[Hegron] Cette génération doit permettre d'une part, la réduction de l'espace de solution et d'autre part, l'exploration de cet espace. La méthode de génération peut être variée : soit à l'aide de calcul, soit par l'emploi de techniques d'intelligence artificielle. La plupart des méthodes consistent à explorer l'ensemble de tous les objets possibles (appelé l'univers des objets) pour y découvrir ceux qui sont solutions, c'est-à-dire ceux qui répondent aux intentions. Il est important de trouver une méthode qui permet au modeleur de gérer un grand nombre de solutions afin que l'outil reste utilisable dans la pratique. [Gallas, 2009]

Les méthodes d'exploration qualifient la puissance du modeleur et elles sont choisies en fonction des objectifs à atteindre par lui : efficacité (fournir une ou des solutions le plus

rapidement possible), complétude (pouvoir fournir toutes les scènes solutions), interactivité (pouvoir guider l'exploration pendant son déroulement par le raffinement de la description en fonction des scènes solutions déjà obtenues). [Bonnefoi, 1999]

C'est pourquoi les modeleurs déclaratifs offrent des outils adaptés leur permettant d'explorer, de naviguer, dans l'espace des solutions. A ce jour, nous distinguons trois catégories d'outils : les outils de raffinement, de parcours et de retouche contrôlée. [Colin, 1998]

II.1.3.3. Phase de connaissance

Une méthode de visualisation permet la prise de conscience par différentes techniques de restitutions des solutions : organisation des fenêtres, proposition en évidence de la ou les solutions les plus pertinentes suivant certains critères… il suffit alors pour l'utilisateur de choisir la solution qu'il juge la plus adaptée. [Gallas, 2009]

Au début de cette phase, les scènes solutions sont proposées à l'utilisateur ; ce dernier peut vérifier si les propriétés utilisées conduisent à des résultats satisfaisants.
Le modeleur déclaratif aide le concepteur dans sa sélection pour une ou plusieurs solutions en le guidant dans l'exploration de l'ensemble des solutions ou dans l'exploration des espaces de solutions proposés. Cette prise de connaissance peut être sous forme textuelle traduite à partir des données manipulées de façon interne par le modeleur, en scènes géométriques qui peuvent être ensuite affichées à l'aide d'un ou des algorithmes de simulation.

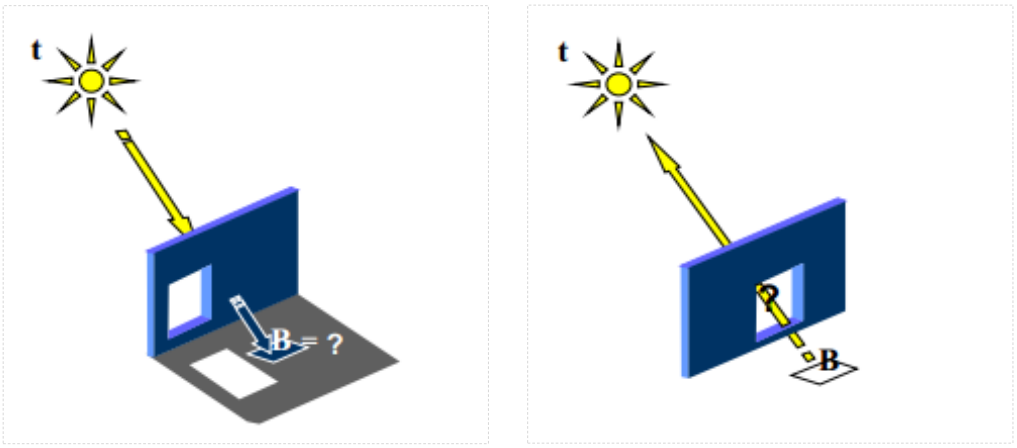
Le modeleur déclaratif peut également fournir des informations supplémentaires (statistiques sur les scènes engendrées) ou améliorer l'aspect visuel comme la sélection d'un « bon » point de vue, c'est-à-dire d'un point de vue permettant d'appréhender au mieux la scène.

II.2. L'Approche inverse en éclairage naturel

II.2. 1. Présentation

Dirigées par le résultat, les méthodes de simulation inverse de l'ensoleillement déterminent les conditions géométriques que doivent remplir les formes (agencement de la composition formelle du projet et choix du type, orientation et emplacement des éléments de l'éclairage naturel) pour réaliser les intentions du concepteur (assurer qu'une zone donnée de l'espace vérifie une qualification d'ensoleillement donnée pour une période donnée). [Siret, 1997]

Cette inversion permet donc de répondre à des contraintes de maitrise des ambiances lumineuses. Elle peut prendre la forme d'une ouverture ou d'un écran (brise-soleil ou visuel, par exemple), si la contrainte est de permettre ou d'empêcher de voir le soleil ou des objets d'une scène, depuis une zone de cette même scène. [Houpert, 2003] Un outil capable de déterminer ces conditions et leurs compositions est susceptible de proposer des solutions géométriques en termes d'évidement ou de masquage des éléments du projet. [D. Siret, 1997]



DIRECTE INVERSE

Fig (24) : Schémas du processus direct et inverse de simulation de l'ensoleillement.

II.2.2. Niveaux de simulation inverse de l'ensoleillement

II.2.2.1. Simulation inverse au niveau bidimensionnel

On entend par simulation inverse bidimensionnelle de l'ensoleillement, toute méthode ou outil de calcul de l'ensoleillement au niveau plan, coupe ou élévation permettant d'avoir le meilleur dimensionnement d'ouverture ou de protection solaire pour que ces dernières soient efficaces et optimales à telle date ou durant telle période de l'année. Les outils utilisés à ce niveau peuvent être des outils simples (diagrammes papier, abaques et autres), de petits programmes informatiques donnant des indications sommaires ou encore des programmes plus sophistiqués. [Houpert, 2003]

Ce premier niveau est souvent employé pour le dimensionnement d'écrans ou d'ouvertures (fonction de protection face aux cas extrêmes).

Le schéma suivant représente un exemple de simulation directe et de simulation inverse au niveau bidimensionnel montrant un redimensionnement de la fenêtre afin de permettre d'assurer l'ensoleillement du plan de travail au solstice d'hiver et le protéger au solstice d'été.

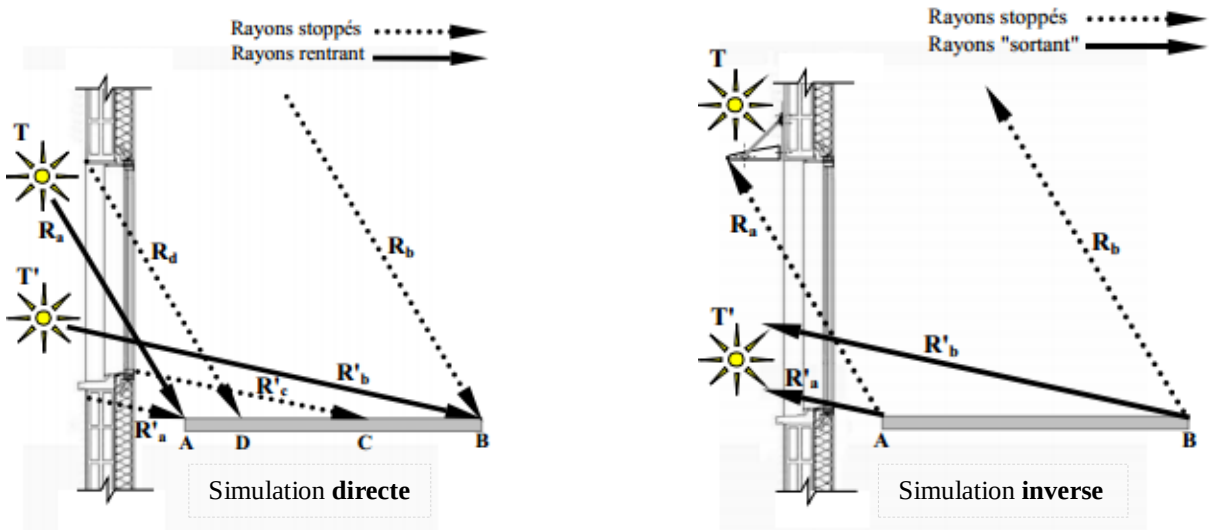


Fig (25) : Schéma représentant la simulation directe et inverse au niveau bidimensionnel.

II.2.2.2. Simulation inverse au niveau tridimensionnel de l'ensoleillement

Dans une simulation inverse 3D de l'éclairage naturel, les trois dimensions de l'espace sont prises en compte ainsi que la dimension temporelle. Le premier essai de simulation inverse 3D dans ce domaine remonte aux années 1960, période pendant laquelle fut publié l'ouvrage de Twarowski "Soleil et Architecture " dans lequel la troisième dimension de l'espace y figure grâce à des courbes de niveau. Depuis cette date, l'application de la simulation inverse au niveau tridimensionnel s'est variée. Comparée à la simulation inverse bidimensionnelle, elle permet de mieux révéler la complexité des contraintes solaires dans l'espace lorsque celles-ci intègrent le temps (protection solaire durant une ou plusieurs périodes). [Houpert, 2003]

II.2.3. Méthodes de simulation inverse de l'ensoleillement

Que ce soit au niveau bidimensionnel ou tridimensionnel, les méthodes géométriques de simulation inverse de l'ensoleillement peuvent être appliquées selon deux modes.

II.2.3.1 Méthodes géométriques

La spécificité de ce premier mode c'est qu'il peut être mis en œuvre soit de manière graphique ou par l'intermédiaire d'un modeleur géométrique. Ce premier mode prend comme base les méthodes géométriques existantes de simulation directes de l'ensoleillement pour ensuite inverser leur mode de fonctionnement à travers une opération de discrétisation, soit du temps ou de l'espace de la scène étudiée. [Siret, 1997]

Cette réversibilité peut être **totale** dans le cas d'inversion des diagrammes et projections solaires visant à étudier l'ensemble des systèmes de projection utilisés pour le calcul des taches/zones d'ombre dans une scène à un instant donné ou à déterminer des plages temporelles d'ensoleillement par la superposition, dans la même projection, des masques apparents autour du point donné. La réversibilité peut être aussi **partielle** pour résoudre des sous-problèmes du problème général de la simulation inverse de l'ensoleillement. Cela en effectuant une intégration géométrique de l'ensoleillement dans le temps et dans l'espace de manière à permettre la réalisation de propriétés d'ensoleillement définies sur des zones continues de l'espace et pour des périodes temporelles également continues. [Siret, 1997]

La spécificité de ce premier mode, c'est qu'il peut être mis en œuvre soit de manière graphique ou par l'intermédiaire d'un modeleur géométrique.

II.3.2 Méthodes informatiques

Par différence au premier, ce deuxième mode peut être mis en œuvre en utilisant, de manière impérative, un support informatique.

Dans ce deuxième mode, le projet architectural apparaît comme une variable isolée de l'ensemble des paramètres descriptifs du champ. Le but est donc d'assurer la performance énergétique et l'éclairement naturel d'un espace intérieur localisé et orienté de manière quelconque. Pour cela trois classes de méthodes sont proposées : **méthodes génératives,** dont le principe repose sur l'idée que face à un problème donné, il est possible de générer, dans un même programme, un grand nombre de solutions plausibles, ces dernières vont être ensuite testées en utilisant une méthode de simulation directe pour en extraire la ou les meilleures conformément à l'objectif ou la contrainte fixée, **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 et **techniques d'optimisation,** 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.

II.2.4. Expressions des intentions

Une des phases les plus importantes dans toute approche inverse faisant une part significative au projet est celle de la représentation et démarcation des intentions par le concepteur. La prise en compte des intentions conceptuelles des utilisateurs est un des enjeux de toute proposition pour une aide à la conception ; ces intentions conceptuelles peuvent être relativement simples (ex: choix implicite de certains paramètres) ou être beaucoup plus complexes car faisant appel à l'interprétation du processus de conception. Pour dégager les vraies intentions conceptuelles, il est donc nécessaire de faire abstraction de ces choix et de généraliser ainsi l'exemple construit. [Tarpin-Bernard]

II.2.4.1. Modes d'expression des intentions

Le mode d'expression peut être aussi bien une expression très libre, une composition d'éléments prédéfinis ou un hybride des deux modes précédents.

Le premier mode est l'expression libre des intentions qui est proche de la création artistique et peut revêtir de nombreuses formes dont l'interprétation est ambigüe et dépendante du contexte. Cependant, nous pouvons noter l'utilisation de l'expression libre dans certains travaux de recherche sur la conception de la géométrie, par la reconnaissance des croquis et la reconstruction du volume associé. [Sosnov, 2002] Le deuxième mode est la composition : ce dernier est plus facile à intégrer dans un modèle de simulation inverse ; il se caractérise par la double possibilité d'expression des intentions ; cette dernière peut se faire, soit par l'écriture d'un script traduisant des contraintes lumineuses [Costa, 1999] ou soit, par la composition d'éclairages pré-calculés. [Marks, 1997]

En se basant sur le principe de cacher les mécanismes de composition pour donner l'apparence d'une expression libre, un troisième mode dit « hybride » d'expression des intentions se positionne entre les deux cas précédents. C'est un mode d'expression avec un ensemble de conventions dans un cadre bien défini et dans lequel chaque action n'a aucune ambigüité pour le modèle. Néanmoins, le concepteur a une impression de liberté parce qu'il peut s'exprimer avec une palette d'outils faciles d'utilisation. [Jolivet, 2002]

II.2.4.2. Interfaces de description

L'interface de description détermine l'interaction homme-machine : c'est la manière dont les intentions d'ambiance lumineuse sont exprimées. Les interfaces de description de l'éclairage pour la simulation inverse sont des interfaces textuelles ou des interfaces graphiques dans un environnement standard. Nous n'avons pas remarqué de travaux utilisant des interfaces alternatives (réalité virtuelle ou autres).

Cependant, il existe une différence entre les interfaces qui permettent d'agir sur des paramètres et de voir le résultat [Kawai, 1993] et les interfaces où l'utilisateur exprime une idée et obtient un résultat approchant. L'expression des intentions architecturales serait plus proche de la seconde approche. [Tourre, 2007]

II.2.4.3. Interfaces textuelles

Considérée comme le plus ancien dispositif du dialogue Homme/machine développé sur les ordinateurs, les interfaces textuelles permettent de décrire beaucoup de propriétés lumineuses, des impressions ou des idées dans lesquelles les intentions d'ambiance sont exprimées par le concepteur en utilisant des mots, parlés ou écrits. L'utilisateur tape donc un texte au clavier (ligne de commande) pour demander à l'ordinateur d'effectuer une opération.

Dans le but d'arriver à une interface textuelle plus adaptée au processus de conception architecturale, plusieurs propositions ont été faites, parmi elles, il y a celle réalisée par Patrick Poulingeas en 2004 sous le principe de formalisation des intentions par une modélisation déclarative basée sur la logique floue. Cela permettait de décrire la position de la source et l'intensité de l'éclairage dans les intentions lumineuses. La relation à l'accessibilité visuelle dépend des mêmes éléments que l'éclairage : les ouvertures. Une deuxième proposition a été réalisée par Antonio Costa en 1999 dans laquelle les objectifs de conception sont décrits de manière très précise par des scripts et permettent de spécifier l'éclairage, l'ombrage ainsi que leur direction pour modéliser le confort visuel.

Une autre proposition est celle de Mahdavi et Berberidou-Kallikova en 1995 dans laquelle, les intentions sont modélisées par des fonctions de préférences ; ces fonctions sont définies par le concepteur ou déduites à partir d'autres sources telles que des attentes de performances énergétiques, des études sociales ou psychologiques, des études statistiques ou autres. Ces

fonctions de préférences permettent de modéliser les attentes du concepteur en fonction-objectifs [Mahdavi, 1995] [Costa, 1999] [Poulingeas, 2004] [Jolivet, 2006]

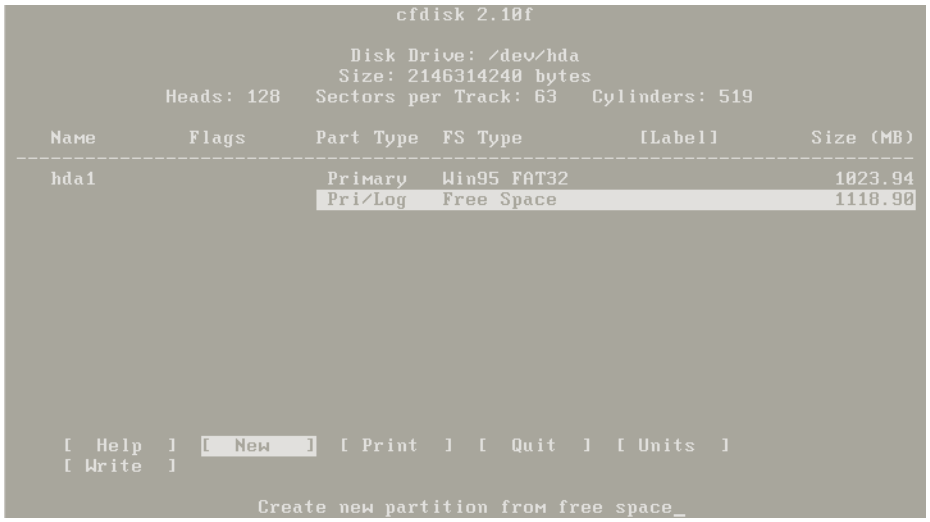


Fig (26) : Exemple d'une interface textuelle d'un logiciel.

II.5.2.2. Interfaces graphiques

Introduites à la fin des années 1970, les interfaces graphiques permettent quant à elles d'exprimer les intentions d'ambiance avec une description visuelle des propriétés lumineuses. En supportant implicitement le positionnement des sources lumineuses, les interfaces graphiques affichent le plan de travail de façon sommaire et permettent au concepteur de modifier les propriétés lumineuses. Les quantités lumineuses (luminance et autres) sont facilement exprimées à l'aide de pinceaux ou de curseurs. La description lumineuse dans une interface graphique peut se faire à l'aide d'une ou de plusieurs photographies avec calibration. [Marschner, 1997] Une première proposition d'une interface graphique a été faite par Schoeneman en 1993 dans le but de peindre la composante directe d'un éclairage artificiel sur les surfaces d'une scène tridimensionnelle. Dans une deuxième proposition faite par Kawai en 1993, l'utilisateur peut ajuster le poids d'une fonction-objectif et spécifier des contraintes lumineuses. Cette fonction-objectif est représentée par un éclairage qui calcule la brillance et permet à l'utilisateur de corriger cette fonction. Marks en 1997 réalise une troisième proposition basée sur l'idée que les intentions sont beaucoup trop complexes à modéliser et la description de l'éclairage se fait par la sélection et la composition de scènes pré-calculées. [Grin, 2011] [Marks, 1997] [Schoeneman, 1993]

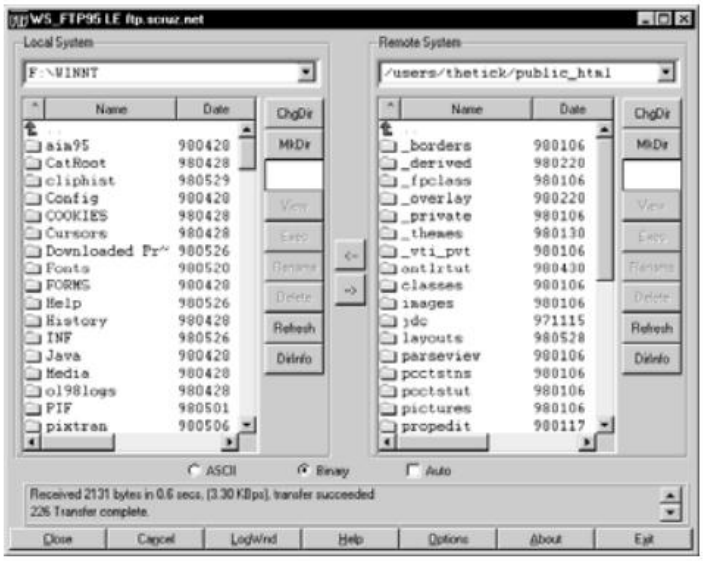


Fig (27) : Exemple d'une interface graphique d'un logiciel.

II.3. Exemple de programmes informatiques de simulation inverse de l'ensoleillement

II.3.1. Le logiciel TRNSHD

TRNSHD est un outil de simulation de l'éclairage naturel développé par le laboratoire d'énergie solaire (SEL) à l'Université de Wisconsin-Madison. Construit pour faire partie de la famille "TRNSYS"[6], ce programme informatique permet de calculer l'ombrage externe et l'ensoleillement interne pour une configuration géométrique donnée. Les résultats d'une analyse avec TRNSHD concernent les périodes d'ensoleillement intérieur ainsi que la protection extérieure sur les murs extérieurs et leurs fenêtres en fonction de la source de rayonnement et d'ombres émis par la construction de murs extérieurs et les obstructions définies. La période d'ensoleillement est définie comme le rapport d'un rayonnement sur une surface, y compris les effets d'ombrage ou de rayonnement sur la surface sans ombrage. La source de rayonnement peut être un rayonnement de faisceau ou rayonnement diffus. En outre, TRNSHD peut déterminer la distribution de rayonnement d'un faisceau qui passe à travers une fenêtre et sur les surfaces intérieures d'une pièce. La limite de l'outil est le fait que les protections solaires sont calculées uniquement pour des éléments accolés à la façade, ce qui représente des cas de figure courants mais pas généraux. [Marion, 1996]

[6] "**TRNSYS**" un programme de simulation du système transitoire avec une structure modulaire.

II.3.2. Le logiciel WINSHADE

C'est un outil informatique intégré développé à l'université de Queensland en Australie. Basé sur les paradigmes de génération et d'optimisation appartenant au domaine de la conception assistée par ordinateur, WINSHADE est conçu pour la conception du contrôle solaire passif à travers les baies. Ce logiciel est organisé en trois modules (l'analyse climatique, la génération et l'optimisation de brise-soleil). En se basant sur les données climatiques du lieu (latitude et longitude) et les propriétés de l'ouverture (orientation et dimensions), il génère et optimise une protection solaire de l'ouverture pendant les périodes choisies. Malgré les possibilités qu'il offre à l'utilisateur, le logiciel WINSHADE présente quelques limites et cela précisément au niveau de sa base des données climatiques qui inclut seulement l'Australie, l'Inde et Singapour. Une autre limite se situe au niveau de son incapacité de prise en charge des ouvertures positionnées sur un plan oblique, comme toiture ou façade inclinées, par exemple (le logiciel exploite uniquement des fenêtres rectangulaires positionnées sur un plan vertical). [Kabre, 1998]

II.3.3. Le logiciel SUSTARC

C'est un logiciel développé à l'Institut de technologie à l'université de Tel Aviv sur le principe des enveloppes solaires : principe avancé par les développeurs eux-mêmes du logiciel qui ont proposé la création de deux types différents d'enveloppes solaires. Ce sont "l'enveloppe des droits solaires" (SRE) et "l'enveloppe de la collection solaire" (SCE). Entre ces deux enveloppes, il existe un volume appelé «volume solaire» (SV): c'est le volume maximal des bâtiments qui doivent être conçus de telle sorte qu'ils permettent l'accessibilité solaire à tous les bâtiments qui les entourent et en même temps, ne sont pas ombragés par eux au cours d'une période donnée de l'année. En utilisant le concept des enveloppes solaires, cet outil de conception simple permet la génération et l'évaluation des configurations de construction, la garantie des droits solaires de chaque bâtiment voisin, ainsi que ceux des espaces verts entre eux. [Capeluto, 2005] [Capeluto, 2006]

II.3.4. Le logiciel CALCSOLAR

C'est un logiciel développé dans le cadre d'un programme de recherche à l'Université de Californie du Sud (USC) à Los Angeles aux Etats-Unis. Le logiciel CalcSolar constitue une version améliorée de "SolVelope" un programme informatique calculant des enveloppes solaires en trois dimensions correspondant à deux heures d'une date choisie. La réponse volumétrique de l'outil est très facile à exploiter dans un modeleur informatique acceptant les

fichiers DXF puisqu'il permet l'exportation des enveloppes solaires sous ce type de fichier. Le récent développement de CalcSolar permet désormais de dessiner, directement dans des modeleurs comme Autocad par exemple, les parties du site concernées par les contraintes d'ombre que représentent les enveloppes solaires calculées par l'outil. Mais, cette dernière version ne permet pas de prendre en compte une contrainte solaire sur une période de plusieurs jours ou plusieurs mois. [Yeh, 1993]

Les logiciels de simulation inverse de l'éclairage naturel dont on a présenté quelques exemples sont, dans la plupart des cas et comme indiqué dans toutes les présentations précédentes, développés dans des laboratoires de recherches des universités. Cependant, aucun d'entre eux n'est commercialisé, soit dans le marché de l'informatique ou dans le cadre de travail pédagogique. Cela rend ces logiciels hors de la portée des architectes/étudiants.

Conclusion

Conséquence de l'évolution continue du domaine de la simulation numérique de l'éclairage naturel, les logiciels à base de cette technique sont de plus en plus nombreux et variés, ce qui leur a permis aujourd'hui d'occuper une place primordiale dans le travail des architectes lors de leur conception.

La simulation de la lumière par ces logiciels permet aux architectes d'anticiper la distribution lumineuse à partir de la définition d'un volume et de la comparer à leurs intentions d'ambiance. [Tourre, 2007] Ce n'est que lorsque la géométrie du volume est finalisée en trois dimensions et avec suffisamment de détails, que la tâche du calcul de la propagation de l'éclairage peut être lancée. Après la visualisation des résultats, c'est l'avis du concepteur vis-à-vis de ces résultats qui permettra de dire, soit que la conception est achevée car il y a un sentiment de satisfaction chez le concepteur, soit, ce n'est pas encore fini et il faut donc revenir à l'étape de la modélisation géométrique pour régler les problèmes apparus dans les résultats et qui ont amené à un sentiment d'insatisfaction chez le concepteur. Durant cette itération, le concepteur retravaille sur les volumes ou les matériaux et apprécie leurs impacts sur l'éclairage. La finalité de ces outils est donc 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…). Mais ces logiciels sont loin de constituer une véritable aide à la conception dans le sens de proposer une solution ou un espace de solutions pour les problèmes d'éclairage naturel.

Dans la logique d'une introduction à l'approche inverse, nous avions mentionné dans ce chapitre, l'existence de différentes approches mettant en avant le problème de l'éclairage naturel mais aussi l'existence de logiciels développés à base de cette approche. Bien qu'ils soient de nombre et de type limités « ces logiciels de simulation inverse sont plus adaptés à la prise en compte globale des intentions d'ambiance lumineuse au cours de la conception architecturale ». [Houpert, 2003]

Le principal inconvénient de ces outils, c'est qu'ils sont, dans la majorité des cas développés dans des laboratoires de recherche et aucun d'entre eux n'est commercialisé. Cela les rend loin des architectes et des étudiants/architectes, ce qui réduit leur présence, leur utilisation et donc leur rôle comme outils d'aide à la conception.

Chapitre III

Vers un modèle numérique de calcul des ouvertures par simulation inverse de l'ensoleillement.

"....Einstein, parlant du modulor, m'écrivait : « c'est une gamme des proportions qui rend le mal difficile et le bien facile. »"
[Le Corbusier]

INTRODUCTION

Qu'il soit profane ou scientifique, l'homme essaye toujours de percer les secrets, de découvrir les mystères et d'introduire de nouvelles lois lui permettant de mieux faire le "faire" que ce soit dans sa vie quotidienne ou professionnelle.

Dans le domaine de l'architecture, cette caractéristique innée de l'homme a été vue/remarquée depuis l'antiquité égypto/gréco-romaine avec les outils de conception et de réalisation qu'ils introduisaient, en passant par les temps modernes, avec comme découverte représentative le modulor introduit par Le Corbusier, jusqu'à l'époque contemporaine, là où les recherches se sont multipliées et ont connu une spécialisation de plus en plus profonde. Malgré la différence de date entre ces différents travaux, un élément essentiel les met tous en relation directe : apporter une aide à l'architecte dans sa mission de conception.

Ce même but dirige notre présent travail de recherche mais avec un niveau beaucoup plus modeste par rapport à ce qui est cité plus haut. Dans notre cas, il s'agit d'introduire un programme mathématique permettant d'aider un architecte à dimensionner les ouvertures de son projet (fenêtres ou autres) au moment de l'esquisse, lorsque les grandes lignes ne sont pas encore fixées. Pour cela, le présent chapitre va être constitué de deux parties : une première partie, dédiée aux calculs mathématiques afin d'arriver à une élaboration d'un modèle numérique permettant la réalisation d'une intention d'éclairage intérieur dans le plan quantitatif par simulation inverse de l'ensoleillement (on propose un niveau d'éclairement nécessaire pour effectuer une tache donnée et on cherche les dimensions de l'ouverture qui permet d'avoir ce niveau d'éclairement sur un point donné). Dans la deuxième partie, les résultats du calcul constitueront les données de base pour une méthode de validation comparative en utilisant des logiciels courants de simulation directe de l'ensoleillement. Les résultats de comparaison donneront ensuite une idée sur le degré du réalisme et de précision du modèle de calcul proposé.

I. Présentation et argumentation du choix du modèle d'espace et des points de calcul

I.1. Présentation et argumentation du modèle d'espace choisi pour le calcul

I.1.1. Géométrie et dimensions

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. Le niveau d'éclairement nécessaire pour effectuer ces taches éducatives est de **500 lux.**

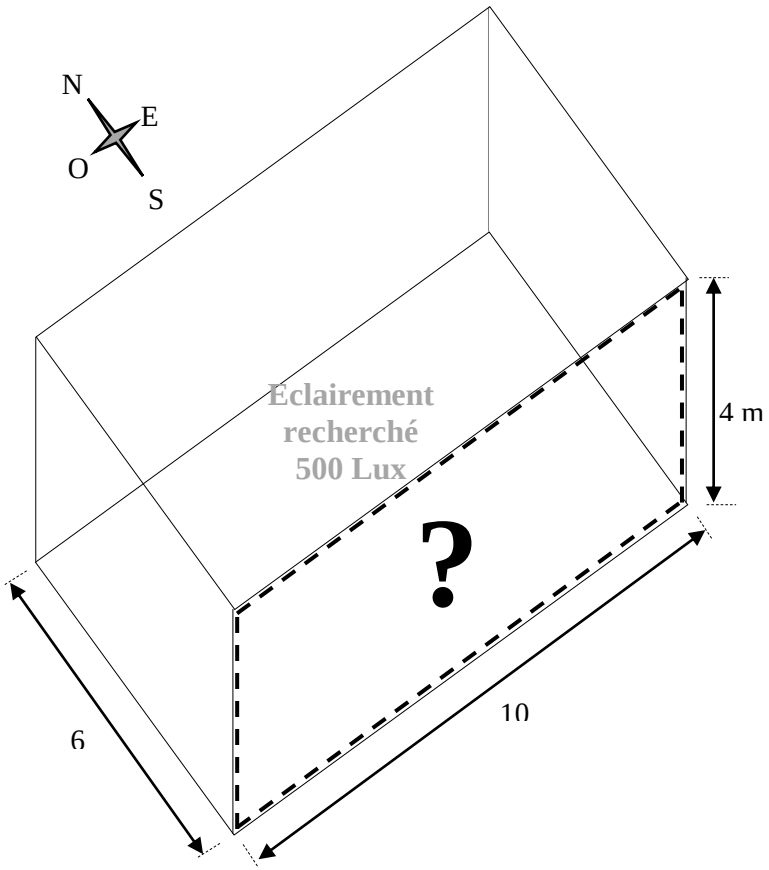


Fig (28) : Géométrie et dimensions du modèle choisi pour le calcul (échelle1/100).

I.1.1.2. Orientation

Orientation du volume : Nord-Sud pour les façades les plus longues.

Orientation de l'ouverture prévue : façade Sud pour profiter des rayons solaires tout en ayant la possibilité de protection.

I.1.1.3. Situation géographique

La ville de Biskra est choisie comme cas d'étude pour le calcul.

Coordonnées géographiques :

- Latitude : 34° 51′ 00 Nord.
- Longitude : 5° 43′ 59 Est.
- Altitude : 213 mètres.

Coordonnées photométriques :

- La valeur de l'éclairement extérieur global reçu sur une surface horizontale correspondant au lieu et à la date du calcul est de : 62 949 Lux. (Voir annexe)

I.1.1.4. Propriétés photométriques

Le sol, les murs et le plafond du modèle choisi sont considérés sans épaisseur et leurs degrés de produire un phénomène optique comme la réflexion, réfraction ou autre sont considérés comme nuls. Ces trois composantes du modèle sont discrétisées et ont pour mission la garantie d'une enveloppe étanche à la lumière extérieure et à la lumière venant de l'élément d'ouverture. De plus, les propriétés d'ouverture sont mises en relation avec les propriétés de l'éclairage naturel : l'élément d'ouverture est considéré comme une source lumineuse intermédiaire filtrant la lumière extérieure et comme la seule source de lumière à l'intérieur du modèle.

I.1.2. Présentation et argumentation du choix des points de calcul

I.1.2.1. Les faces choisies pour abriter les points de calcul

Tous les points de calcul choisis sont alignés sur un plan de travail situé à 0,85 mètres au-dessus du sol.

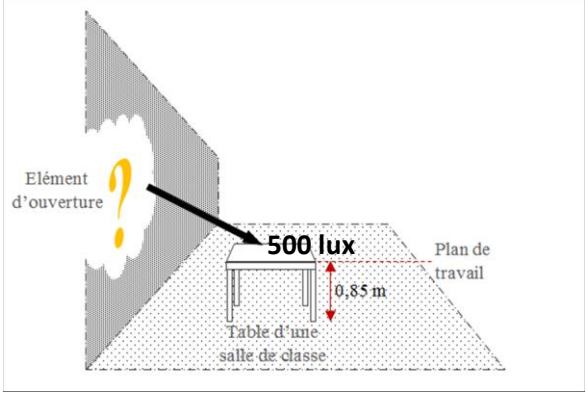


Fig (29) : Hauteur du plan de travail et meilleur côté pour la prévenance de la lumière.

I .1.2.2. Choix de l'emplacement des points constituants les données de calcul

Le premier point de calcul **(P1)** représentera la zone la plus proche par rapport à l'élément d'ouverture. Le deuxième point de calcul **(P2)** représentera le milieu de l'espace et le troisième point de calcul **(P3)** représentera la zone la plus lointaine par rapport à l'élément d'ouverture ; ceci donnera une idée sur la profondeur du système d'éclairage. Les trois points de calcul choisis sont représentés dans la figure suivante :

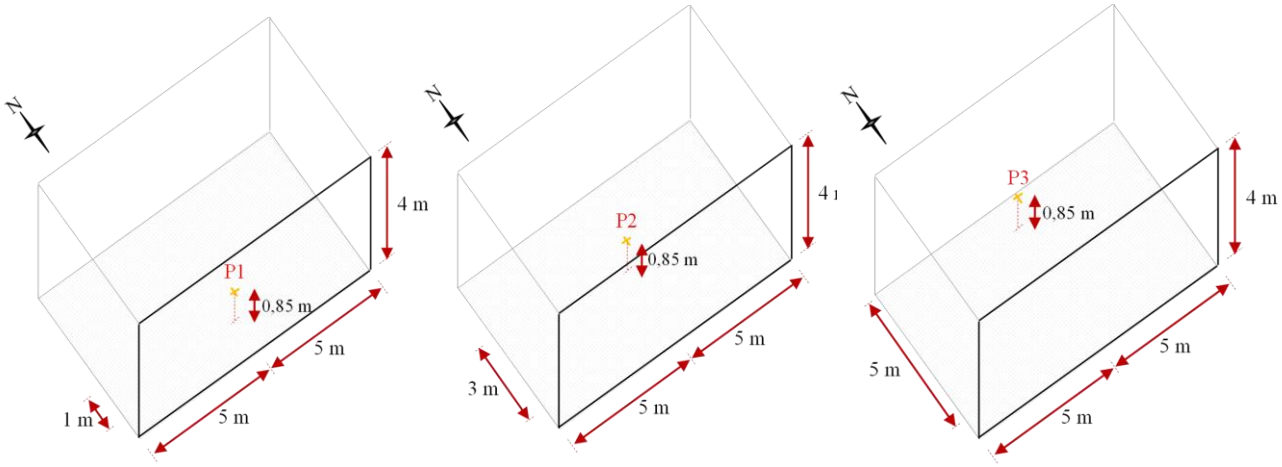


Fig (30) : Axonométrie représentant l'emplacement des trois points (P1, P2 et P3) par rapport à l'espace (échelle 1/200).

I.2. Les étapes de calcul

I.2.1. 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] (plus d'informations sur ce modèle au chapitre I). Ce modèle a été choisi par la disponibilité des travaux de validation, par sa capacité à inclure tous types de ciel et tout emplacement géographique.

Le logiciel choisi pour le calcul est MATLAB R2009b ; un logiciel développé par l'entreprise américaine THE MATHWORK ; c'est un langage de haut niveau et un environnement interactif pour le calcul numérique, la visualisation et la programmation. [mathworks.com]

Calcul des apports lumineux fournis par l'environnement lumineux extérieur (Ciel + Soleil).

▼

A la fin de cette étape, le flux reçu par l'élément d'ouverture sera connu.

Fig (31) : schéma synthétisant le déroulement du calcul (1)

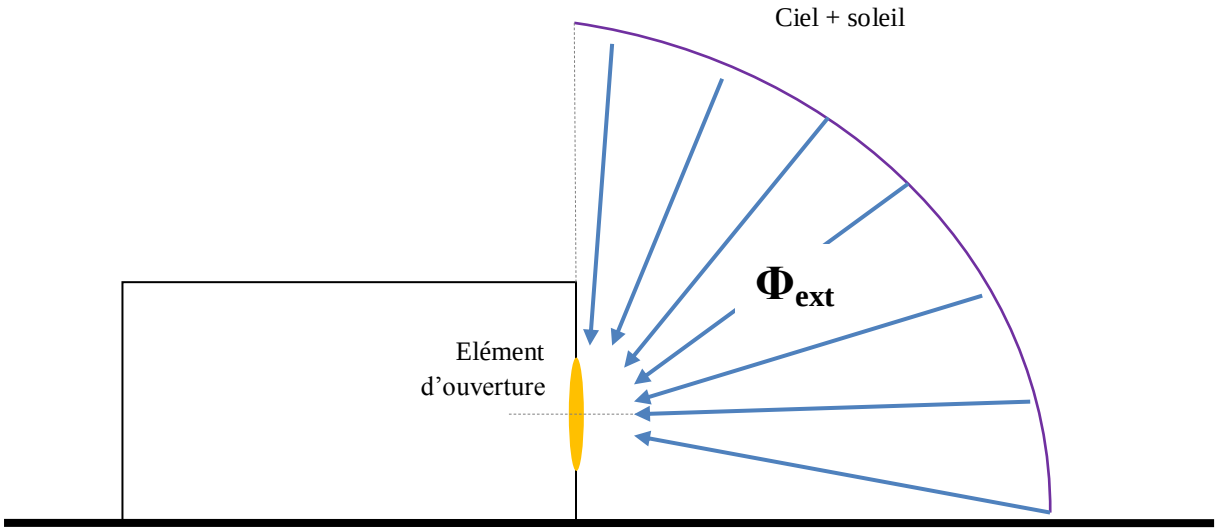


Fig (32) : Description des données de calcul pour l'étape (1)

I .2.1.1. Données du calcul (1)

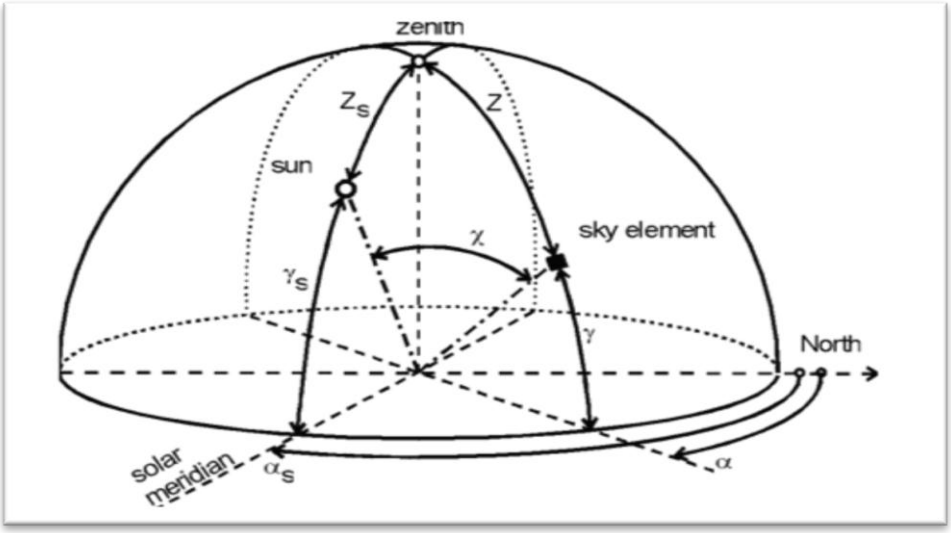


Fig (33): Description des angles utilisés pour le calcul (1).

- Les tableaux suivants montrent les valeurs des différents angles et coefficients choisis et nécessaires pour le calcul (1) :

Donné	Symbole	Valeur (°)	valeur (rad)	Correspondance	source
Angle azimutal du soleil par rapport au plan vertical	αs	122,28	2,13	13/05/2013 à 11:OO Biskra	sunearthtools.com
Angle azimutal de l'élément de ciel par rapport au plan vertical	α	120,18	2,10	06/10/1986 à 10:OO Constantine	Choisie
Altitude ou hauteur du soleil.	γs	63,59	1,11	13/05/2013 à 11:OO Biskra	sunearthtools.com
Altitude ou hauteur élément de ciel.	γ	27,29	0,48	06/10/1986 à 10:OO Constantine	Choisie
Angle zénithal soleil.	Zs	26,41	0,46	13/05/2013 à 11:OO Biskra	sunearthtools.com
Angle zénithal élément de ciel.	Z	62,71	1,09	06/10/1986 à 11:OO Constantine	Choisie
Différence d'azimut entre l'élément et le méridien solaire.	Az	-2,1	-0,44	/	calculée
Distance angulaire entre l'élément de ciel et le soleil.	χ	0,84	0,63	/	calculée

Tab (3) : Valeurs des différents angles et distances nécessaires pour le calcul (1).

Donné	Symbole	Valeur	Correspondance	source
L'assombrissement ou l'éclaircissement de la région de l'horizon.	a	-1	Ciel Type 11, gradation IV, indication 4	Kittler, 2002
Le gradient de luminance près de l'horizon.	b	-0,55	Ciel Type 11, gradation IV, indication 4	
l'intensité relative de la région du circumsolaire.	c	10	Ciel Type 11, gradation IV, indication 4	
La largeur de la zone du circumsolaire.	d	-3	Ciel Type 11, gradation IV, indication 4	
La lumière rétrodiffusée relative.	e	0,45	Ciel Type 11, gradation IV, indication 4	

Tab (4) : Valeurs des différents coefficients nécessaires pour le calcul (1).

I.2.1.2. Etapes du calcul (1)

I .2.1.2.1. Calcul de la gradation et des fonctions indicatrices

- La fonction de gradation pour un élément de ciel dans la direction de vue:

$$\Phi(Z) = 1 + a \exp(b/\cos Z) \quad \text{---------- (1) [Kittler, 2002]}$$

ϕ(Z) =	**0,6987**

- La fonction de gradation pour zénith :

$$\Phi(0°) = 1 + a \exp(b/\cos 0°) \quad \text{---------- (2) [Kittler, 2002]}$$

ϕ(0°) =	**0,4231**

I.2.1.2.2. Calcul des fonctions indicatrices

- La fonction indicatrice d'un élément de ciel en direction de vue:

$$f(X) = 1 + c\,[\exp(d.X) - \exp(d\pi/2)] + e\cos^2 X \quad \text{---------- (3) [Kittler, 2002]}$$

f (χ)=	**2,6949**

- La fonction indicatrice pour le zénith:

$$f(Zs) = 1 + c\,[\exp(d.Zs) - \exp(d\pi/2)] + e.\cos^2 Zs \quad \text{---------- (4) [Kittler, 2002]}$$

f (Zs)=	**3,7798**

I.2.1.2.3. Calcul de la luminance par rapport à la direction de la vue normalisée à zénith luminance est:

$$L\gamma\alpha / Lz = \varphi(Z)\, f(X) / ((\varphi(0°)\, f(Zs)) \quad \text{---------- (5) [Kittler, 2002]}$$

Ou : LϒαLz : luminance élément de ciel / Lz : lumiance au zénith

Lγα/Lz=	**1,1775**

I.2.1.2.4. Calcul de la luminance zénithale

$$Lz = (1{,}376\ T_L - 1{,}81)\ tan\ \gamma s + 0{,}38 \quad \text{---------- (6) [Karayel, 1983]}$$

T_L=	5,5	high	facteur de trouble de Linke
L_z (L_{vz}) =	**11974**	**cd/m2**	**luminance au zénith**

I.2.1.2.5. La valeur absolue de la luminance du ciel dans l'élément choisi est:

$$L\gamma\alpha = Lvz\ (L\gamma\alpha/Lz) \quad \text{---------- (7) [Kittler, 2002]}$$

LϒαΥα=	**14100**	**cd/m2**

I.2.1.3. Résultat du calcul (1)

La luminance du ciel par rapport à l'élément de ciel choisi est de : **14 100 cd/m^2**

I.2.2. Etape (2) : Calcul des surfaces des éléments d'ouverture

Pour le calcul de la surface que doit avoir l'élément d'ouverture pour atteindre le niveau d'éclairement voulu, nous avons eu recours aux séries de formules réalisées par Vincent TOURRE dans sa thèse de doctorat [Tourre, 2007].

La suite du calcul est réalisée par le logiciel choisi MATLAB R2009b.

Les angles nécessaires au calcul ont été mesurés à l'aide du logiciel Autodesk Autocad 2012 dans lequel les trois cas ont été dessinés.

Calcul de la surface de l'élément d'ouverture.

▼

A la fin de cette étape, les surfaces répondant aux intentions à éclairer seront connues.

Fig (34) : Schéma synthétisant le déroulement du calcul (2)

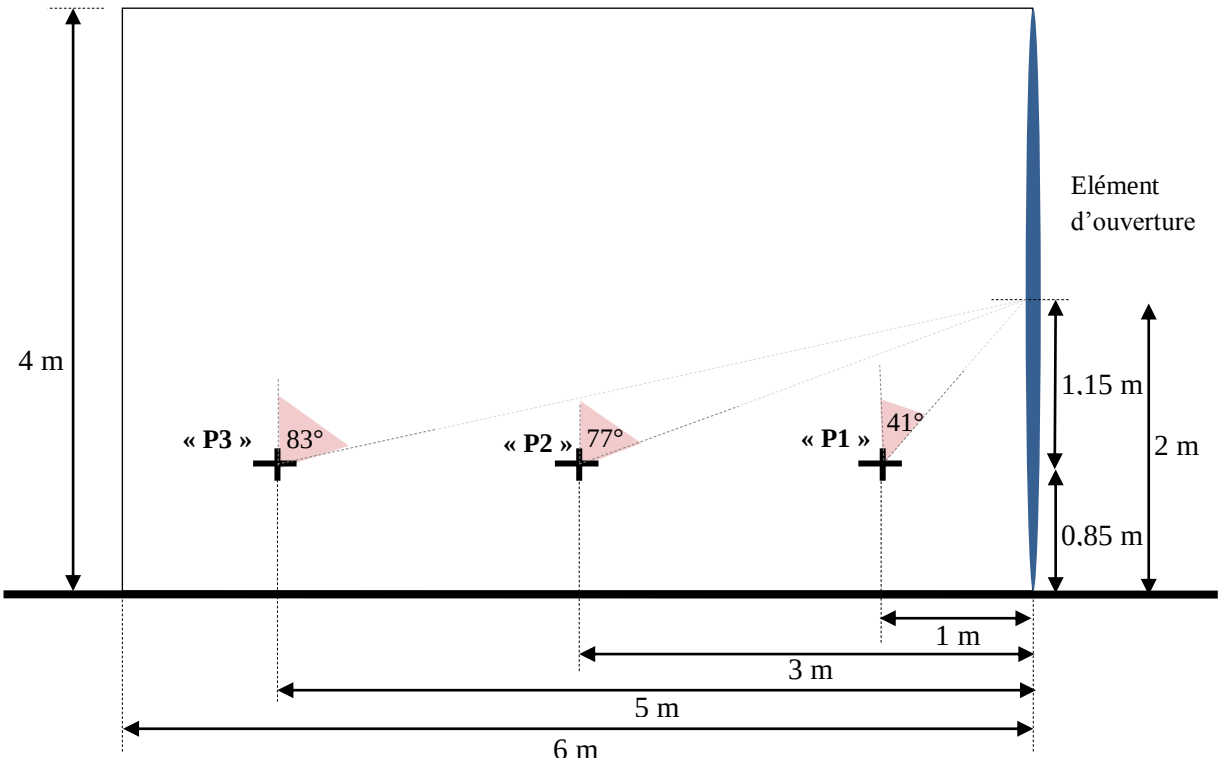


Fig (35) : Description des données nécessaires pour le calcul (2).

I.2.2.1. Données du calcul

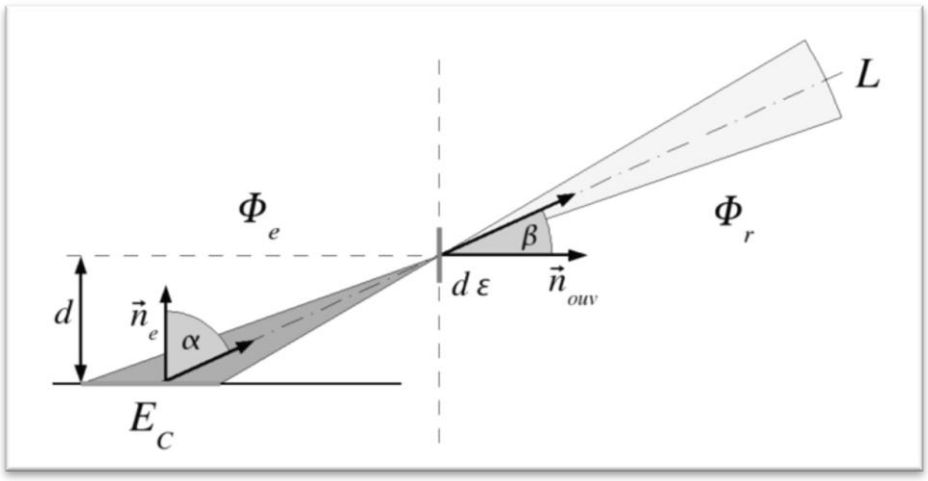


Fig (36) : Description des angles utilisés pour le calcul (2).

- Le tableau suivant monre les valeurs des différents angles, coefficients et distances choisis et nécessaires pour le calcul (2) :

Donné	Symbole	Valeur	unité	source
l'angle entre la normale du point à éclairer (P1) et la direction de la surface éclairée vers l'élément d'ouverture	α1	41	Degré	mesurée
l'angle entre la normale du point à éclairer (P2) et la direction de la surface éclairée vers l'élément d'ouverture	α2	77	Degré	mesurée
l'angle entre la normale du point à éclairer (P3) et la direction de la surface éclairée vers l'élément d'ouverture	α3	83	Degré	mesurée
l'angle entre la normale de l'élément d'ouverture et la direction de l'élément d'ouverture vers la facette source	β	63,69	Degré	mesurée
distance entre l'élément d'ouverture et la face qui porte le point à éclairer (P1)	d1	1,15	mètre	mesurée
distance entre l'élément d'ouverture et la face qui porte le point à éclairer (P2)	d2	1,15	mètre	mesurée
distance entre l'élément d'ouverture et la face qui porte le point à éclairer (P3)	d3	1,15	mètre	mesurée
le coefficient de transmission de l'élément d'ouverture.	τ	1	/	mesurée

Tab (5) : Valeurs des différents coefficients nécessaires pour le calcul.

I.2.2.2. Les étapes de calcul

I.2.2.2.1. Calcul du flux lumineux émis par un élément d'ouverture Φe

Le flux lumineux Φe émis par un élément d'ouverture peut s'exprimer selon l'éclairement E d'une surface éclairée S.

$$\phi_e = E \,.\, S \rightarrow S = \frac{\Omega e \,.\, l^2}{\cos \alpha} \quad \text{(8)} \ [\text{Tourre, 2007}]$$

Φe : flux lumineux émis par un élément d'ouverture

E : éclairement d'une surface éclairée S

Ωe : l'angle solide contenant le flux Φe

α: l'angle entre la normale de la surface éclairée et la direction de la surface éclairée vers l'élément d'ouverture

l : la distance entre l'élément d'ouverture et le centre de la surface éclairée

I .2.2.2.2. En remplaçant S dans l'équation précédente, on obtient :

$$\phi_e = \frac{E \,.\, \Omega e \,.\, l^2}{\cos \alpha} \quad \text{(9) [Tourre, 2007]}$$

I .2.2.2.3. Puis en remplaçant la distance l par la distance entre l'élément d'ouverture et la face qui porte la surface éclairée d = l • cos α, on obtient :

$$\phi_e = \frac{E \,.\, \Omega e \,.\, d^2}{\cos^3 \alpha} \quad \text{(10) [Tourre, 2007]}$$

I.2.2.2.4. Pour qu'il y ait conservation de l'énergie lumineuse, le flux reçu Φr est transmis, réfléchi ou absorbé, selon respectivement, les coefficients de transmission, de réflexion ou d'absorption de l'élément d'ouverture.

Le flux lumineux Φe émis vers l'intérieur est égal au flux transmis par l'élément d'ouverture :

$$\phi_e = \phi_r \,.\, t \quad \text{(11) [Tourre, 2007]}$$

t : le coefficient de transmission de l'élément d'ouverture.

I.2.2.2.4. On peut donc exprimer l'éclairement provenant du ciel E_C en fonction de la luminance L, en remplaçant Φr et Φe dans l'équation :

$$E_C = \int_S \frac{L \,.\, \Omega_r \,.\, \cos^3 \alpha \,.\, \cos \beta \,.\, t \,.\, d\varepsilon}{\Omega e \,.\, d^2} \quad \text{(12) [Tourre, 2007]}$$

I.2.2.2.5. Si l'on considère qu'il n'y a pas de phénomènes de diffraction ou de réfraction, alors Ωr = Ωe

$$E_C = \int_S \frac{L \,.\, \cos^3 \alpha \,.\, \cos \beta \,.\, t \,.\, d\varepsilon}{d^2} \quad \text{(13) [Tourre, 2007]}$$

I.2.2.2.7. Grandeurs des différentes valeurs nécessaires pour le calcul

	valeur	unité
Ec (1)	2039	/
Ec (2)	54	/
Ec (3)	9	/

Tab (6) : Valeurs des différentes grandeurs nécessaires pour les éléments d'ouverture.

I.2.2.3. Résultats du calcul

La surface nécessaire pour chaque élément d'ouverture pour avoir 500 lux dans chaque point de calcul est comme suit :

Résultats de calcul		
surface	valeur	unité
S (1):	0,7010	m2
S (2):	4,3035	m2
S (3):	10,541	m2

Tab (7): Valeurs des différentes surfaces nécessaires pour les éléments d'ouverture.

I.2.3. Configuration des éléments d'ouvertures obtenus

La forme des éléments d'ouvertures est considérée comme carrée (chaque côté représente la racine carrée de la surface résultante) :

résultats de calcul		
surface	coté	unité
S (1):	0,84	m
S (2):	2,07	m
S (3):	3,25	m

Tab (8) : Valeurs des différents côtés constituants les éléments d'ouverture.

Les dimensions et l'emplacement exact des éléments d'ouverture par rapport au mur choisi pour les abriter sont montrés dans les figures suivantes :

I.2.3.1. Elément d'ouverture (F1)

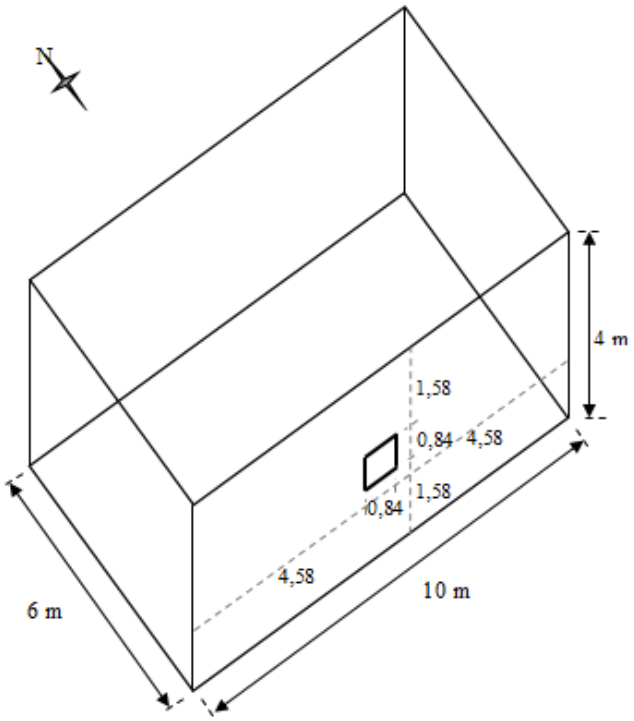


Fig (37) : Axonométrie représentant les dimensions et l'emplacement de (F1)

I.2.3.2. Elément d'ouverture (F2)

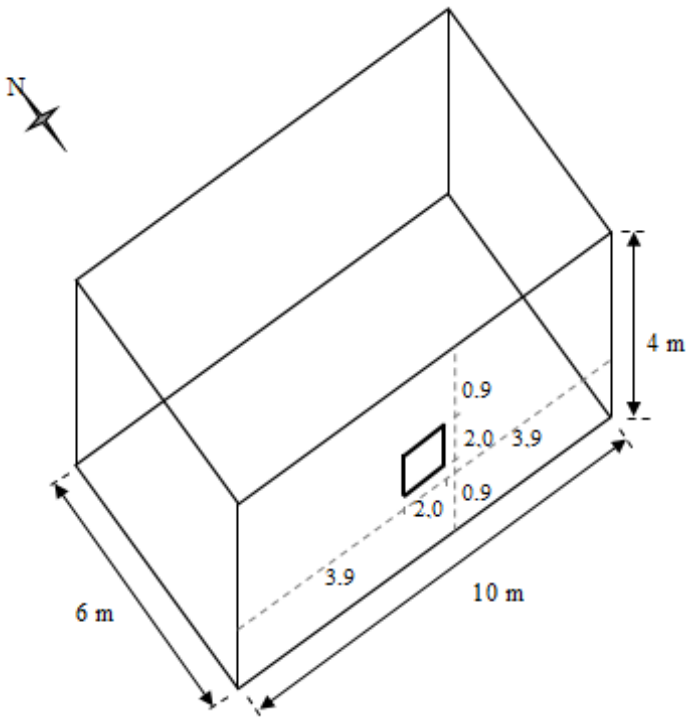


Fig (38) : Axonométrie représentant les dimensions et l'emplacement de (F2)

I.2.3.3. Elément d'ouverture (F3)

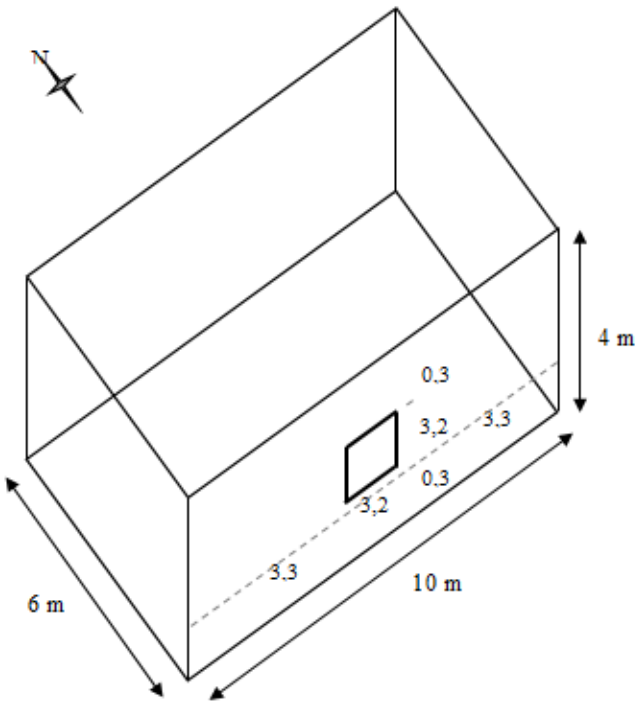


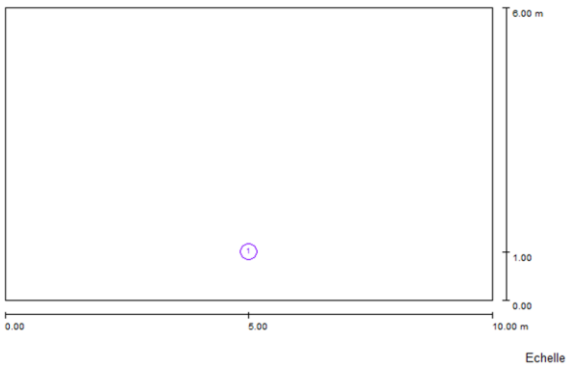
Fig (39) : Axonométrie représentant les dimensions et l'emplacement de (F3)

I .3. Validation des résultats du calcul

Le type de validation choisi est "la validation comparative" (plus de détails au chapitre II). Les logiciels choisis sont, d'un côté, DIALux 4.11 (exemple de logiciels gratuits) et dans un autre côté, Ecotect Analysis 2011 (exemple de logiciels payants).

I.3.1. Résultats du calcul avec DIALux 4.11

I.3.1.1. Résultats du calcul au point (P1)

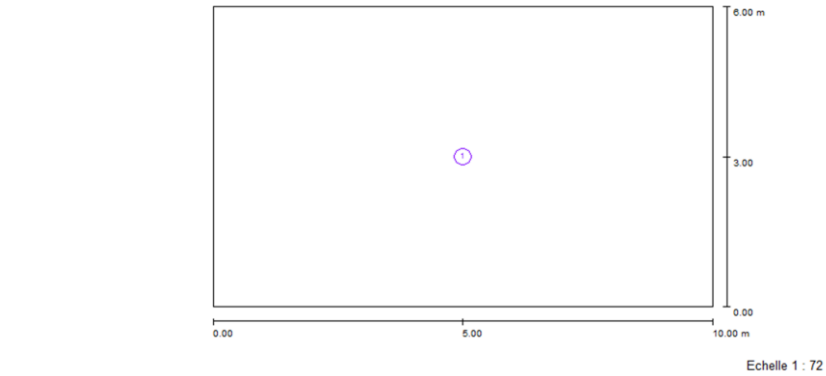


Liste des points de calcul

N°	Désignation	Type	Position [m] X	Y	Z	Rotation [°] X	Y	Z	Valeur [lx]
1	Point de calcul horizontal 1	horizontal, plat	5.000	1.000	0.850	0.0	0.0	0.0	649

Fig (40) : Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P1).

I.3.1.2. Résultats du calcul au point (P2)

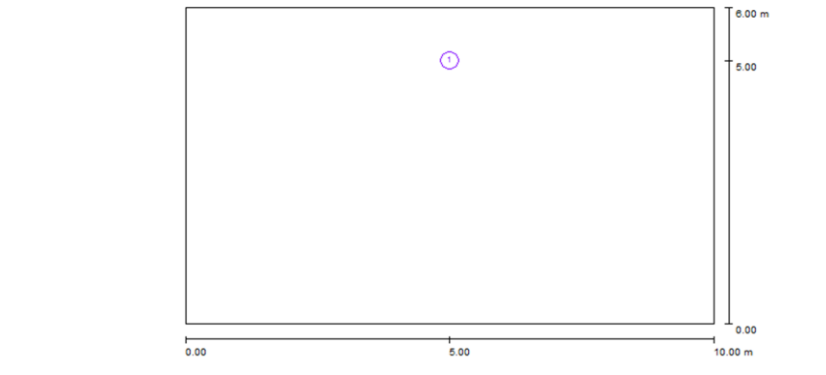


Liste des points de calcul

N°	Désignation	Type	Position [m] X	Y	Z	Rotation [°] X	Y	Z	Valeur [lx]
1	Point de calcul horizontal 1	horizontal, plat	5.000	3.000	0.850	0.0	0.0	0.0	651

Fig (41) : Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P2).

I.3.1.3. Résultats du calcul au point (P3)



N°	Désignation	Type	Position [m] X	Y	Z	Rotation [°] X	Y	Z	Valeur [lx]
1	Point de calcul horizontal 1	horizontal, plat	5.000	5.000	0.850	0.0	0.0	0.0	659

Fig (42) : Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P3).

I.3.2. Résultats du calcul avec Ecotect Analysis 2011

I.3.2.1. Résultats du calcul au point (P1)

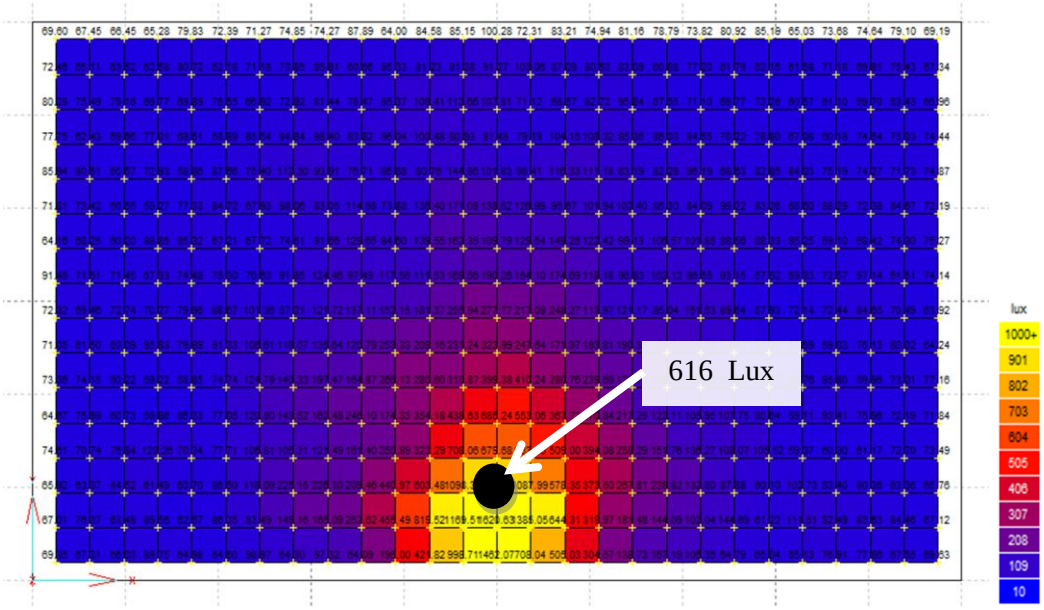


Fig (43) : Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P1).

I.3.2.2. Résultats du calcul au point (P2)

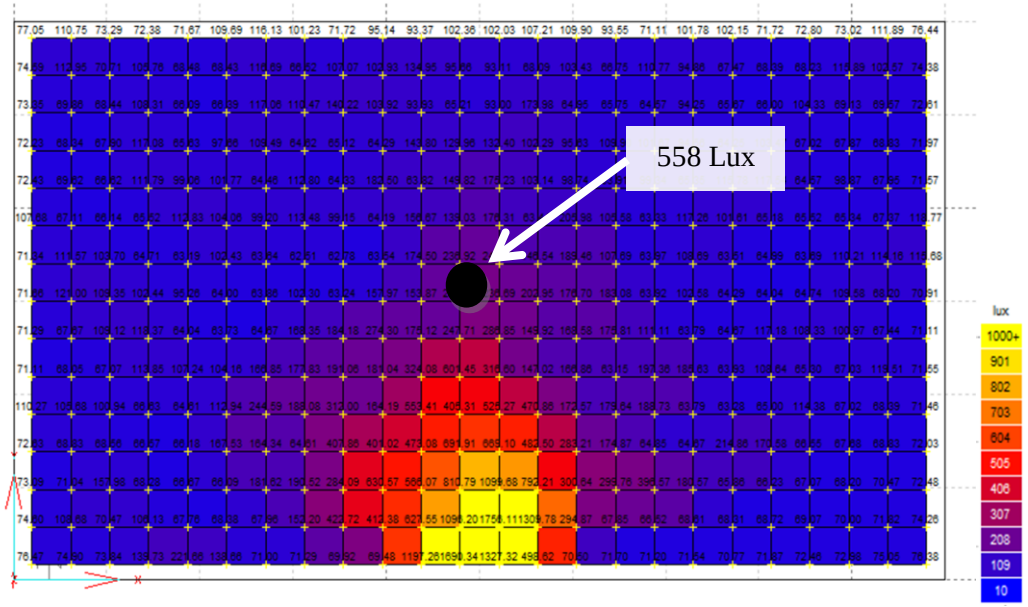


Fig (44) : Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P2).

I.3.2.3. Résultats du calcul au point (P3)

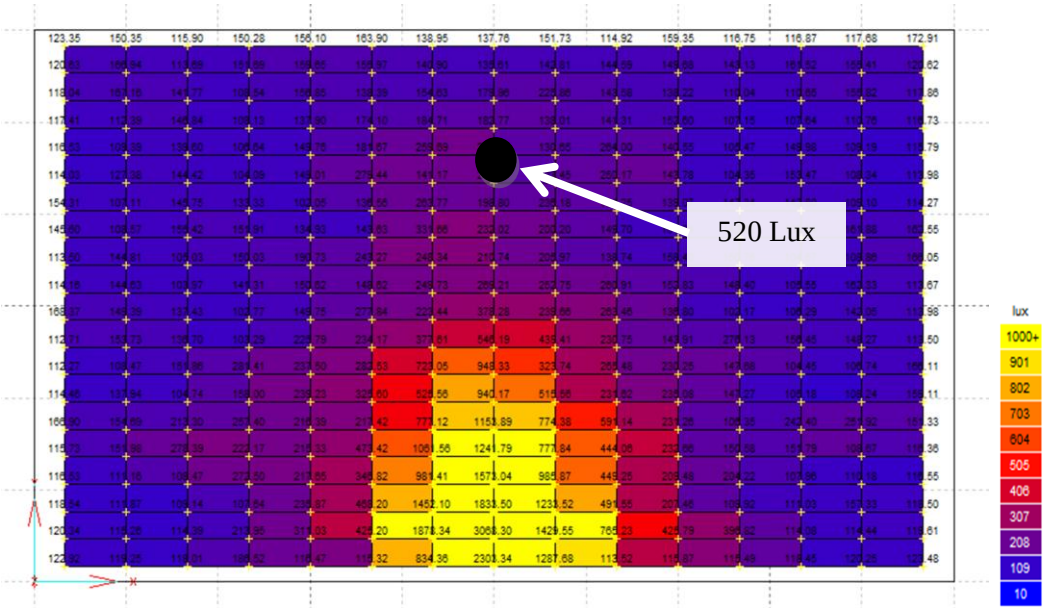


Fig (45) : résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P3).

I.3.3. Remarque et interprétation des résultats de la validation

I.3.3.1. Récapitulation des résultats de la validation

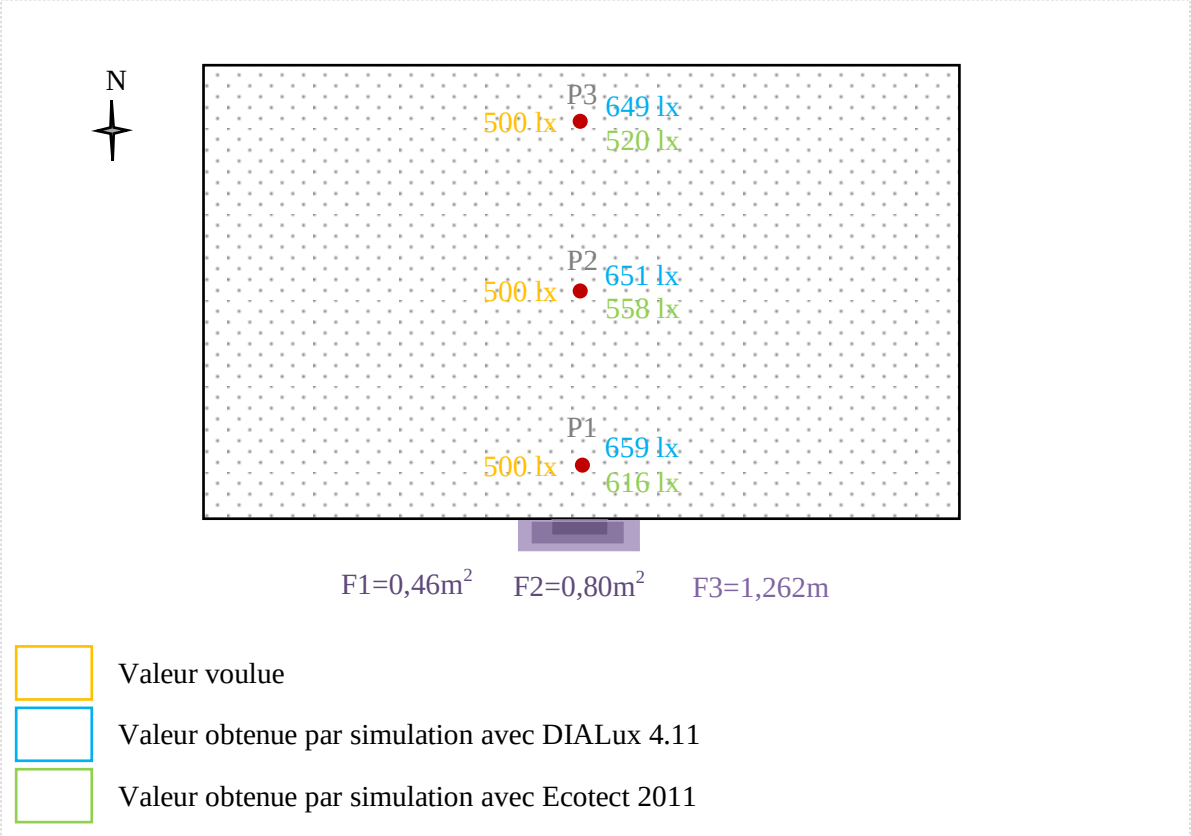


Fig (46) : Vue en plan représentant une récapitulation des résultats de la validation.

I.3.3.2.Interprétation

Toutes les valeurs d'éclairement issues de simulations soit par DIALux 4.11 ou Ecotect Analysis 2011 sont au dessus de la valeur souhaitée (500 lux), cela est du a :

- D'un côté, pendant la phase de calcul des apports lumineux extérieurs, seul le soleil et le ciel représentaient l'environnement lumineux extérieur et vu l'impossibilité de controle/choix de ces composantes dans les logiciel utilisés, les environnements bâti et naturel peuvent être introduits par ces logiciels lors de la simulation, ce qui peut être une des causes des résultats élevés de la validation.

- D'un autre côté, lors du calcul de la distribution de la lumière à l'intérieur de l'espace par l'élément d'ouverture, tous les phénomènes optiques étaient considérés comme nuls, ce qui ne peut pas être le cas dans le calcul fait par les logiciels utilisés ; cette probalité est la conséquence de la complexité de l'interface utilisateur qui caratérise en grand partie les logiciels payants et qui augmente la possiblité d'oubli ou d'ignorance, par l'utilisateur, d'un des paramêtres de contrôle de productivité de ces phénomènes optiques.

I.3.4. Evaluation statistique des écarts des résultats

I.3.4.1. Présentation et application de la méthode adoptée

Afin d'évaluer les variations des écarts relatifs entre les valeurs voulues lors du calcul numérique et celles obtenues par simulation numérique des points (P1), (P2) et (P3), nous avons adopté une méthode développée par Michel Lejeune dans le domaine des statistiques. Cette méthode permet, à l'aide de deux coefficients : le taux de variation (TV) et le coefficient de multiplication (CM), de comprendre avec précision et de quantifier avec exactitude l'écart entre les différentes valeurs. [LEJEUNE, 2010]

$$TV = \frac{\text{Valeur de Simulation} - \text{Valeur Voulue}}{\text{Valeur de Voulue}} .100 \quad \text{(14) [LEJEUNE, 2010]}$$

Le passage du taux de variation (TV) au coefficient multiplicateur se fait à l'aide de la formule suivante :

$$CM = \frac{(TV)}{100} + 1 \quad \text{(15) [LEJEUNE, 2010]}$$

La valeur du Coefficient Multiplicateur varie entre :

CM=1 → les valeurs comparées sont identiques.

CM >1→ la valeur obtenue est au-dessus de celle voulue.

CM <1 → la valeur obtenue est en-dessous de celle voulue.

Après l'application numérique des formules à base des données issues de la validation, nous avons résumé les valeurs de CV et CM dans le tableau suivant:

Point	DIALux 4.11		ECOTECT 2011	
	TV	CM	TV	CM
P1	31,80	1,32	23,20	1,23
P2	30,20	1,30	11,60	1,12
P3	29,80	1,30	40,00	1,04

Tab (9) : Synthèse des valeurs des TV et de CM pour tous les points de calcul.

I.3.4.2.Interprétation

- Toutes les valeurs du coefficient multiplicateur sont au dessus de 1, ce qui permet de dire que le niveau d'éclairemant obtenu est dans tous les cas, au dessus du niveau voulu.

- Les valeurs du coefficient mutiplicateur sont comprises entre (CM = 1,04 et CM = 1,32) ce qui reflète la bonne concordance entre les valeurs voulues et celles obtenues par simulation.

- L'écart entre la valeur la plus basse et la valeur la plus haute est de (0,02) pour les résultats obtenus par DIALux et de (0,19) pour les résultats obtenus par ECOTECT : donc, les valeurs sont sur la même plage de variation.

- Dans les deux cas de simulaion (avec DIALux et ECOTECT), le coefficient multiplicateur est a sa valeur la plus haute au premier point ; cette valeur diminue au deuxième point et atteint sa valeur la plus basse au troisième point. Cela permet de dire que le degré de précision de notre calcul est le plus réduit auprés de l'élément d'ouverture et s'élève légèrement au fur et au mesure qu'on s'éloigne de l'élément d'ouverture.

- Entre les deux logiciels utilisés, les résultats obtenus par Ecotect Analysis 2011 ont un écart moindre que ceux obtenus par DIALux 4.11 Cela peut être dû en grande partie à la catégorie du logiciel ECOTECT (payant) ce qui lui permet d'avoir une précision plus grande que celle d'un logiciel (gratuit) comme DIALux dans notre cas.

IV. Le modèle développé MSNIEN

IV.1. Présentation

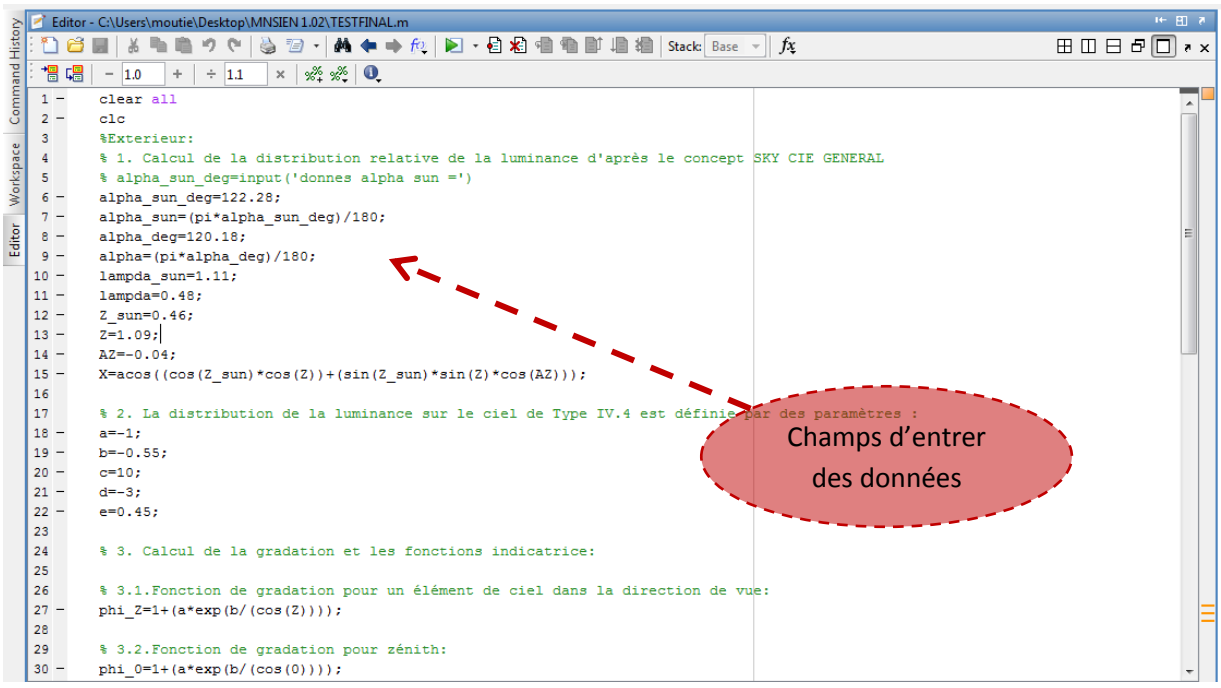
Le MNSIEN est le **M**odèle **N**umérique de **S**imulation **I**nverse de l'**E**clairage **N**aturel développé et validé dans le présent chapitre. C'est un fichier MATLAB M-file dans lequel s'affiche seulement les données à inclure et les résultats de calcul.

IV.1. Utilisation de MNSIEN

IV.1.1. 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. Cela peut être intétégré dans la page de calcul sous forme d'abaques.

- L'emplacement du point de calcul (son hauteur par raapport au sol et sa distance par rapport au mur. Cela peut être mesuré par le concepteur à partire d'une incluant seulement le point de calcul et le mesure désigné à recevoir l'élément d'ouverture (fenêtre ou autres).




```
clear all
clc
%Exterieur:
% 1. Calcul de la distribution relative de la luminance d'après le concept SKY CIE GENERAL
% alpha_sun_deg=input('donnes alpha sun =')
alpha_sun_deg=122.28;
alpha_sun=(pi*alpha_sun_deg)/180;
alpha_deg=120.18;
alpha=(pi*alpha_deg)/180;
lampda_sun=1.11;
lampda=0.48;
Z_sun=0.46;
Z=1.09;
AZ=-0.04;
X=acos((cos(Z_sun)*cos(Z))+(sin(Z_sun)*sin(Z)*cos(AZ)));

% 2. La distribution de la luminance sur le ciel de Type IV.4 est définie par des paramètres :
a=-1;
b=-0.55;
c=10;
d=-3;
e=0.45;

% 3. Calcul de la gradation et les fonctions indicatrice:

% 3.1.Fonction de gradation pour un élément de ciel dans la direction de vue:
phi_Z=1+(a*exp(b/(cos(Z))));

% 3.2.Fonction de gradation pour zénith:
phi_0=1+(a*exp(b/(cos(0))));
```

Fig (47) : Représentation de la page de calcul comme interface utilisateur.

IV.1.2.Visualisation des résultats

Après le lancement du calcul, les résultas 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.

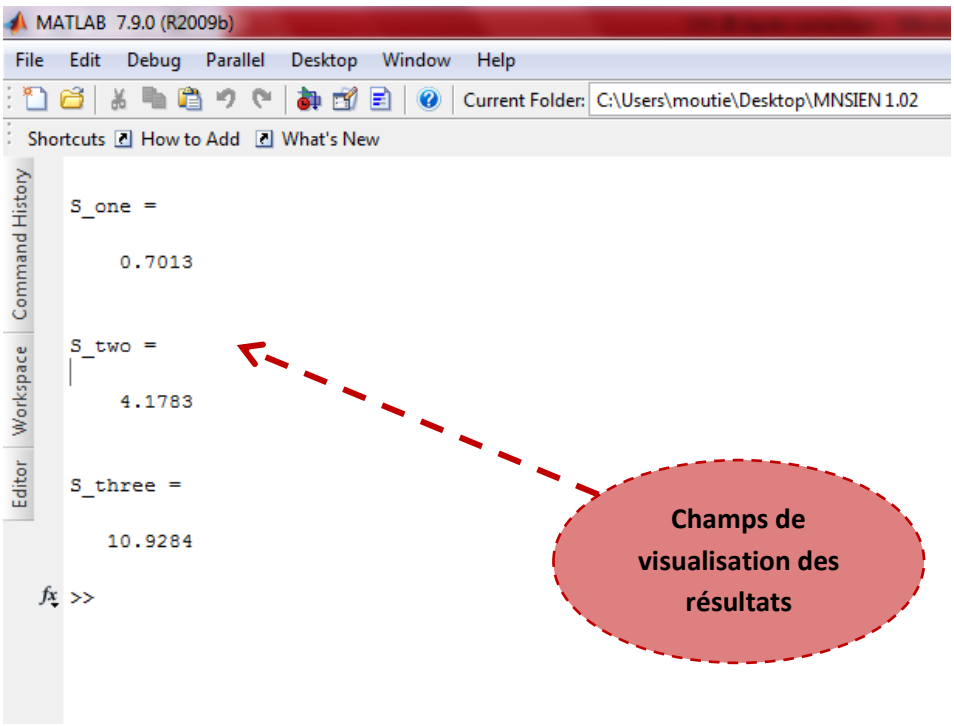


Fig (48) : Palette incluant les résultats de calcul (output du modèle).

N.B :

A partir de ces résultats, le concepteur a une idée sur la surface que doivent avoir les éléments d'ouverture (fenêtre ou autres) dans ces espaces en cours de conception. Il est maintenant libre de choisir le volume et la forme de l'espace et des éléments d'ouverture à condition de respecter les dimensions issues du calcul.

L'utilisation de MNSIEN n'influe pas sur la configuration mophique 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.

CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons essayé de présenter les étapes du développement d'un modèle numérique de simulation inverse de l'éclairage naturel, un modèle développé par l'adoption d'autres travaux de recherche récents en relation directe avec le but recherché.

Malgré les quelques lacunes décelées dans ce modèle en matière de correspondance entre les résultats de validation (en utilisant des logiciels de simulation directe comme DIALux 4.11 et ECOTECT Analysis 2011) et les résultats voulus, ce modèle a fait preuve d'une garantie d'un niveau d'éclairement toujours plus important que celui recherché, ce qui évitera la survenance d'insuffisance et d'inefficacité de l'élément d'ouverture obtenu (il reste à vérifier l'absence d'effet d'éblouissement non-atteint dans notre cas d'étude, vu que le plus grand écart est de 159 lux). Cette remarque constituera le premier point positif en faveur de ce modèle.

L'autre point positif pour ce dernier, c'est qu'il s'approche le plus vers les résultats d'un logiciel payant, ce qui est satisfaisant vu sa destination prévue aux étudiants/architectes dans les établissements universitaires pédagogiques. Un troisième point positif pour ce modèle, c'est le degré de précision de ces résultats ce qui donne à l'utilisateur une idée plus au moins claire sur les dimentions de l'élément d'ouverture qu'il doit adopter pour concrétiser ces intentions d'ambiance lumineuse. A ces derniers, s'ajoute un autre point positif pour ce modèle : c'est la facilité d'utilisation qui caractérise son emploi car il suffit seulement d'introduire les angles correspondants à la position du soleil et celui de l'élément du ciel par rapport à la date et à l'heure choisies pour ensuite avoir les résultats de l'application numérique.

A travers le listing des points relativement positifs du modèle numérique développé, nous estimons avoir introduit un outil d'aide au dimensionnement des ouvertures, cela en permettant aux étudiants/architectes de tenir compte de de cet élément dès les premières phases de leur travail de conception ; ceci aboutira à l'optimisation de l'ensoleillement dans les projets architecturaux.

Chapitre IV

Application du modèle dans une situation réelle de conception des ouvertures.

"Dans la nature, tout a toujours une raison. Si tu comprends cette raison, tu n'as plus besoin de l'expérience."

Léonard DE VINCI

INTRODUCTION

Si le vécu a été toujours considéré comme essentiel pour tout architecte/concepteur au cours de sa formation professionnelle, c'est parce que, d'un côté le vécu est indispensable pour la bonne compréhension des projets/espaces d'architecture et dans un autre côté, parce qu'il est irremplaçable par d'autres outils comme les textes, les photos ou même les vidéos (rien ne peut accomplir la mission de chacun des outils/techniques dans la construction du bagage de l'architecte).

Par analogie à ce qui précède, la mise en œuvre de toute proposition d'aide à la conception architecturale dans une situation réelle de conception peut elle aussi être vue comme évidente au vu des opportunités que cette opération offre. Dans notre cas, l'application du modèle développé permet de comprendre de manière plus claire la méthode adoptée « approche inverse », d'avoir une idée sur la possibilité d'intégration de cette approche par les concepteurs durant les premières phases de conception et de saisir ainsi les apports acquis en utilisant ce modèle en matière de réduction du nombre de tâtonnements au cours de la conception des ouvertures, cela en assurant une optimisation de l'ensoleillement dans le projet architectural.

Durant le présent chapitre, nous allons donc soumettre notre modèle à une situation réelle de conception des ouvertures, cela en proposant à des étudiants/architectes d'accomplir le même exercice en utilisant dans un premier temps des outils de simulation directe de l'éclairage et dans un deuxième temps, en introduisant notre modèle comme proposition d'aide intégrée avec les données de l'exercice. La comparaison des résultats donnera ensuite une idée sur le degré de concrétisation des buts recherchés et ouvrira une discussion à propos des apports du modèle développé. Vu le cadre de notre recherche, cette expérience a pour objectif de montrer un cas d'utilisation de notre modèle mais les résultats ne peuvent pas être généralisés pour toutes les situations de conception. Cela est dû, d'un côté, au nombre important des variantes qui caractérise le processus de conception et dans un autre côté, à la diversité des concepteurs.

I. Présentation de l'expérience

I.1. Environnement de l'expérience

I.1.1. Lieu de l'expérience

- Ville : Biskra, Algérie.

- Endroit : Université Mohamed Kheider Biskra, Département d'architecture.

- Salle **:** Salle de TD (salle infographie dédiée au module modélisation)

I.1.2. Date et heure de l'expérience

Date : Mercredi 19/03/2014 : cette date marque le début du deuxième semestre de l'année universitaire 2013/2014.
Heure : 09h 00 (Gmt +1) : cette heure représente le début de la journée ; un moment durant lequel les étudiants sont aptes pour un travail de concentration pour l'apprentissage des logiciels et modèle numérique ainsi que pour l'accomplissement de l'exercice.

I.1.3. Outils utilisés durant l'expérience

Outils de travail : Ordinateur P4, Carte graphique 1G, RAM 2G, Mémoire 240 G et le Système d'exploitation Windows XP.
Autres outils : papier blanc de format A4 marqué d'une zone de texte réservée à l'écriture du nom et prénom.

I.1.4. Sujets de l'expérience

I.1.4.1. Méthode d'échantillonnage :

Afin de sélectionner un échantillon pour l'expérience, nous avons adopté une méthode d'échantillonnage dit « probabiliste-stratifiée » : c'est une méthode de sélection ou chaque élément a une probabilité d'être sélectionné.

I.1.4.2. Taille de l'échantillon :

Les étudiants de Master 1 **LMD** ont été choisis selon les critères suivants :

- Ces étudiants sont titulaires d'un diplôme de Licence LMD, cela après avoir étudié pendant trois années durant lesquelles ils ont acquis un minimum de savoir et de savoir-faire en matière de conception des projets d'architecture.

- Durant cette première année de Master, les étudiants de ce niveau sont sensés apprendre à utiliser des outils de CAO traitant divers côtés/ambiances du projet architectural et parmi elles, l'ambiance lumineuse à travers le module de modélisation.

- De plus, ces étudiants de Master I suivent des cours concernant des sciences pour l'architecture qui tournent autour de la lumière naturelle dans le bâtiment, le confort visuel et l'ambiance lumineuse.

I.1.4.3. Mode de tirage :

Vu le nombre limité d'individus constituant la population, nous avons opté pour le mode de tirage manuel qui est un procédé probabiliste par lequel on choisit des éléments à la main parmi tous ceux de la population.

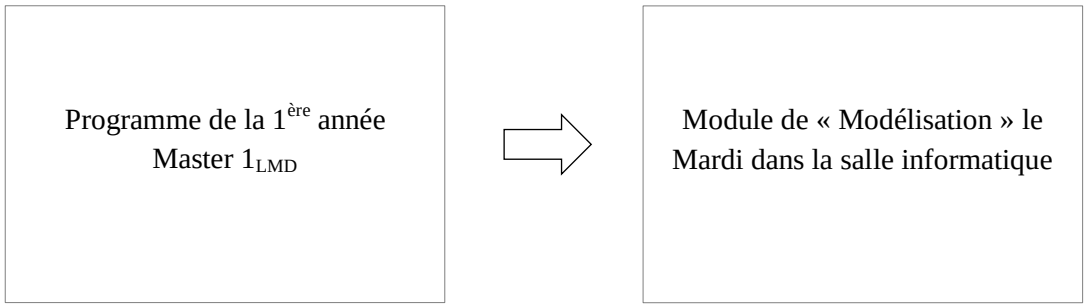


Fig (49) : Choix de l'échantillon pour l'exercice.

I.1.4.4. Répartition des étudiants choisis pour l'expérience en deux groupes

Groupe A	**Groupe A**
A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A16, A17, A18, A19.	B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15, B16, B17, B18, B19.

Fig (50) : Codage des membres des deux groupes choisis pour l'exercice.

I.2. Déroulement de l'expérience

Les deux groupes d'étudiants choisis pour l'expérience accomplissent, au même moment, l'expérience en passant par deux phases :

I.2.1. Phase « cours »

Durant cette phase, chacun des deux groupes (groupe A et groupe B) apprend à utiliser respectivement le logiciel DIALux 4.11.02 et MNSIEN, cela à travers un cours comprenant les informations suivantes :

I. Introduction

- Auto-présentation de l'auteur et une présentation de l'expérience à réaliser.

II. Présentation du logiciel DIALux 4.11.02 et de MNSIEN

- Nature de DIALux et MNSIEN comme produits informatiques.

III. Comment obtenir l'outil ?

- Téléchargement de DIALux et des logiciels nécessaires pour MNSIEN.

IV. Etapes de travail avec le logiciel DIALux 4.11.02 et MNSIEN

- Depuis les informations générales jusqu'aux résultats finaux.

V. Conclusion

I.2.2. Phase « exercice »

Après s'être assuré que les étudiants ont bien compris le contenu du cours, il est demandé à chacun d'eux de faire individuellement un exercice consistant à concevoir un système d'éclairage naturel (fenêtre) pour une salle de classe permettant d'avoir un éclairement de 500 lux au milieu de l'espace pour le groupe A et à un mètre du mur pour le groupe B. Les dimensions de la salle, les coordonnées géographiques du lieu et la date/heure du calcul sont identiques à ceux choisis lors du développement de notre modèle et ils sont fournis en tant que données de l'exercice.

N.B : (le détail de l'expérience est indiqué dans l'annexe)

II. Résultats de l'expérience

Légende

A1, A2, A3,…A19 → sujets de l'expérience (spécimen)

B1, B2, B3,…B19 → sujets de l'expérience (spécimen)

D → dimension de l'élément d'ouverture (mètre)

E → éclairement obtenu au point de calcul (lux)

S → surface de l'élément d'ouverture (mètre carré)

V → évaluation (selon l'échelle d'appréciation)

II.1. Résultats du groupe A (utilisant DIALux 4.11.02)

	Tentative 1		Tentative 2		Tentative 3		Tentative 4		Tentative 5		Tentative 6		Tentative 7		Tentative 8	
	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E
A1	1 x 2	250	2 x 3,5	873	1,5 x 3	581	1,5 x 2,5	485	1,5 x 2	383	3 x 1	346	2 x 3	744	2 x 2	503
A2	2,3 x 1,8	420	2,3 x 2	463	2,5 x 2,1	519	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A3	4 x 2,5	944	3 x 1,5	552	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A4	2 x 3	713	2,2 x 2	540	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A5	1,5 x 1,2	206	3 x 2,5	926	2 x 1,5	369	2 x 2	503	/	/	/	/	/	/	/	/
A6	1,2 x 1	134	2 x 2	503	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A7	1 x 2	99	3 x 2	744	2,5 x 1,7	544	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	1		2		2											

A8	x 2,0	236	x 4	1060	x 2	503	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A9	1,5 x 1	171	1,5 x 3	581	1,5 x 2,5	485	1,5 x 2,8	536	/	/	/	/	/	/	/	/
A10	2,5 x 2	626	2 x 1,5	369	2 x 2	503	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A11	1,5 x 1,5	276	2 x 3	744	2 x 2	503	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A12	1,2 x 1,2	159	3 x 3	1081	2 x 2	495	2 x 2,1	517	/	/	/	/	/	/	/	/
A13	1,6 x 2	404	2 x 2	503	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A14	1 x 1,2	147	1,2 x 1,2	184	1,5 x 3	610	1 x 3	572	1,5 x 2,5	509	/	/	/	/	/	/
A15	2 x 1	139	2,5 x 2	626	2 x 1,5	378	2 x 2	503	/	/	/	/	/	/	/	/
A16	2,2 x 2	630	1,8 x 2	453	2 x 2	503	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A17	2 x 1,5	377	2 x 2,5	634	2,2 x 1,8	515	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A18	1,2 x 1,4	196	1,5 x 2	378	2 x 2,5	626	2 x 2	503	/	/	/	/	/	/	/	/
A19	1 x 1,25	106	2 x 1,5	256	2 x 3	629	1,7 x 3	538	1,5 x 3	491	1,75 x 2,75	502	/	/	/	/

Tab (10) : Tableau représentant les résultats de l'expérience pour le groupe A.

Autres observations

- Durée de l'expérience → 2 heures 38 minutes.

- Cas d'incapacité à utiliser DIALux 4.11.02 → aucun cas.

- Demande d'aide → la majorité des étudiants.

- Nombre de tentatives :

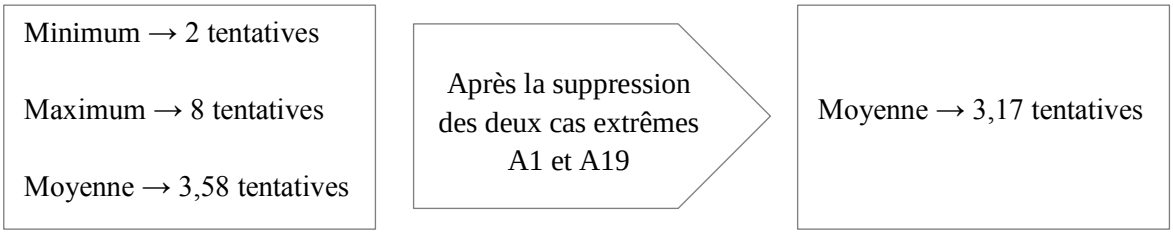


Fig (51) : Réajustement des résultats de l'expérience.

- Nombre d'étudiants pour chaque tentative :

tentative	Nombre d'étudiants participants à chaque tentative	% Par rapport au nombre total	Nombre d'étudiants satisfaits à la fin de chaque tentative	% Par rapport aux restants
T1	19	100 %	0	0 %
T2	19	100 %	3	21 %
T3	15	79 %	7	47 %
T4	8	42 %	5	63 %
T5	3	16 %	1	33 %
T6	2	11 %	0	0 %
T7	2	11 %	0	0 %
T8	2	11 %	2	100 %

Tab (11) : Tableau représentant le nombre d'étudiants pour chaque tentative.

II.2. Résultats du groupe B (utilisant MNSIEN 1.02)

	Tentative	
	S (m^2)	**D (m)**
B1	0,78	0,88 x 0,88
B2	0,8	0,89 x 0,89
B3	0,7	0,84 0,84
B4	0,81	0,9 x 0,9
B5	0,709	0,84 x 0,84
B6	0,795	0,89 x 0,89
B7	0,7	0,84 x 0,84
B8	0,95	0,97 x 0,97
B9	0,79	0,89 x 0,89
B10	0,72	0,85 x 0,85
B11	0,75	0,87 x 0,87
B12	0,87	0,93 x 0,93
B13	0,68	0,82 x 0,82
B14	0,77	0,88 x 0,88
B15	0,7	0,84 x 0,84
B16	0,8	0,89 x 0,89
B17	0,788	0,89 x 0,89
B18	0,771	0,88 x 0,88
B19	0,727	0,85 x 0,85

Tab (12) : Tableau représentant les résultats de l'expérience pour le groupe B.

Autres observations :

- Durée de l'expérience → 40 minutes.

- Cas d'incapacité à utiliser MNSIEN 1.02 → Aucun cas.

- Demande d'aide → la majorité des étudiants.

Nombre de tentatives :

Tous les étudiants ont affiché une seule tentative.

Tentative	Nombre des participants à la tentative	% Par rapport au nombre total	Nombre des satisfaits	% Par rapport aux restants
T1	19	100 %	19	100%

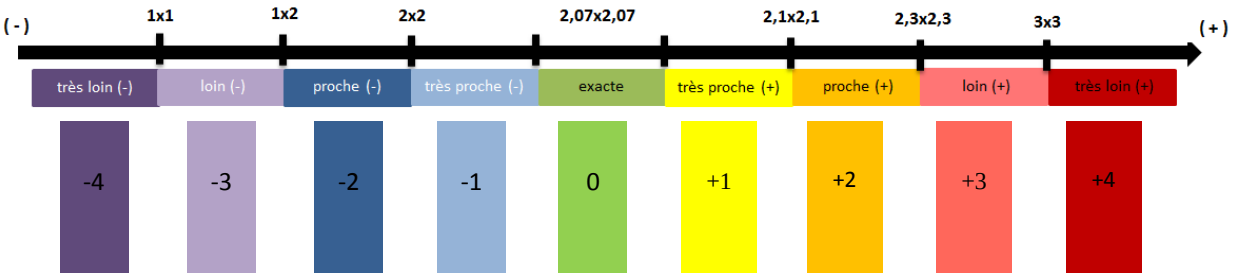
Tab (13) : Tableau représentant le nombre d'étudiants pour la seule tentative.

III. Etude des résultats de l'expérience

III.1. Evaluation des résultats

III.1.1. Evaluation des résultats du Groupe A

III.1.1.1. Paramètre "**Dimension**" de l'élément d'ouverture



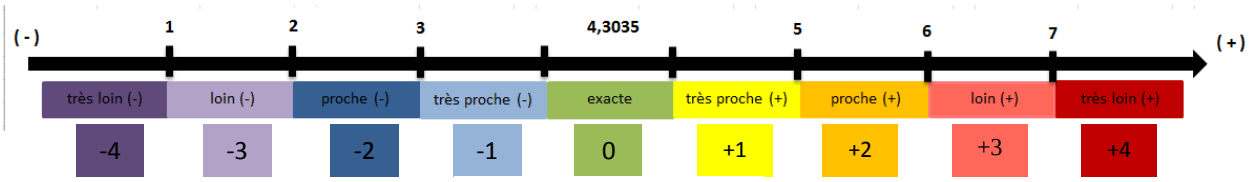
Echelle d'évaluation

	Tentative 1		Tentative 2		Tentative 3		Tentative 4		Tentative 5		Tentative		Tentative		Tentative8	
	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V
A1	1 x 2	-3	2 x 3,5	+4	1,5 x 3	+4	1,5 x 2,5	+3	1,5 x 2	+1	3 x 1	+4	2 x 3	+4	2 x 2	-1
A2	2,3 x 1,8	+3	2,3 x 2	+3	2,5 x 2,1	+3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A3	4 x 2,5	+4	3 x 1,5	+4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A4	2 x 3	+4	2,2 x 2	+2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A5	1,5 x 1,2	-4	3 x 2,5	+4	2 x 1,5	+3	2 x 2	-1	/	/	/	/	/	/	/	/
A6	1,2 x 1	-4	2 x 2	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A7	1 x 2	-4	3 x 2	+4	2,5 x 1,7	+3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	1	-4	2	+4	2	-1										

A8	**x 2,0**	-4	**x 4**	+4	**x 2**	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A9	**1,5 x 1**	-4	**1,5 x 3**	+4	**1,5 x 2,5**	+3	**1,5 x 2,8**	+3	/	/	/	/	/	/	/	/
A10	**2,5 x 2**	+3	**2 x 1,5**	-2	**2 x 2**	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A11	**1,5 x 1,5**	-3	**2 x 3**	+4	**2 x 2**	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A12	**1,2 x 1,2**	-3	**3 x 3**	+4	**2 x 2**	-1	**2 x 2,1**	+1	/	/	/	/	/	/	/	/
A13	**1,6 x 2**	-3	**2 x 2**	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A14	**1 x 1,2**	-3	**1,2 x 1,2**	-3	**1,5 x 3**	+4	**1 x 3**	+4	**1,5 x 2,5**	+3	/	/	/	/	/	/
A15	**2 x 1**	-3	**2,5 x 2**	+3	**2 x 1,5**	+2	**2 x 2**	-1	/	/	/	/	/	/	/	/
A16	**2,2 x 2**	+2	**1,8 x 2**	-2	**2 x 2**	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A17	**2 x 1,5**	-3	**2 x 2,5**	+3	**2,2 x 1,8**	+2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A18	**1,2 x 1,4**	-3	**1,5 x 2**	-2	**2 x 2,5**	+3	**2 x 2**	-1	/	/	/	/	/	/	/	/
A19	**1 x 1,25**	-3	**2 x 1,5**	-2	**2 x 3**	+4	**1,7 x 3**	+4	**1,5 x 3**	+4	**1,75 x 2,75**	+3	/	/	/	/

Tab (14) : Tableau représentant une évaluation des résultats du groupe A, paramètre « Dimension »

III.1.1.2. Paramètre "**Surface**" de l'élément d'ouverture



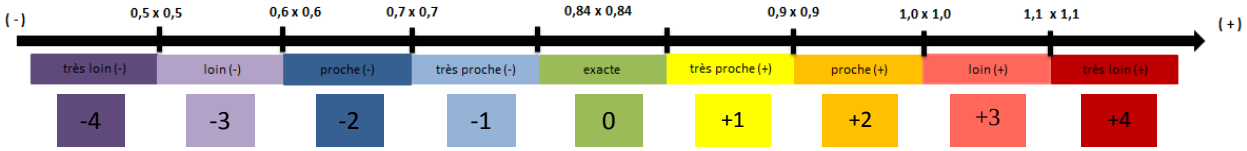
Echelle d'évaluation

	Tentative 1		Tentative 2		Tentative 3		Tentative 4		Tentative 5		Tentative		Tentative		Tentative8	
	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E
A1	2	-3	7	+4	4,5	+1	3,75	-1	3	-2	3	-2	6	+2	4	-1
A2	4,14	-1	4,6	+1	5,25	+2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A3	10	+4	4,5	+1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A4	6	+2	4,4	+1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A5	1,80	-3	7,5	+4	3	-2	4	-1	/	/	/	/	/	/	/	/
A6	1,2	-3	4	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A7	2	-3	6	+2	4,25	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A8	2	-3	8	+4	4	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A9	1,5	-3	4,5	+1	3,75	-1	4,2	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A10	5	+1	3	-2	4	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A11	2,25	-2	6	+2	4	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A12	1,44	-3	9	+4	4	-1	4,2	-1	/	/	/	/	/	/	/	/
A13	3,20	-1	4	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A14	1,2	-3	1,44	-3	4,5	+1	3	-2	3,75	-1	/	/	/	/	/	/
A15	2	-3	5	+1	3	-2	4	-1	/	/	/	/	/	/	/	/
A16	4,40	-1	3,6	-1	4	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A17	3	-2	5	+1	3,96	-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
A18	1,68	-3	3	-2	5	+1	4	-1	/	/	/	/	/	/	/	/
A19	1,25	-3	3	-2	6	+2	5,1	+2	4,5	+1	4,81	+1	/	/	/	/

Tab (15) : Tableau représentant une évaluation des résultats du groupe A, paramètre « surface »

III.1.2. Evaluation des résultats du Groupe B

III.1.2.1. Paramètre "**Dimensions**" de l'élément d'ouverture



Echelle d'évaluation

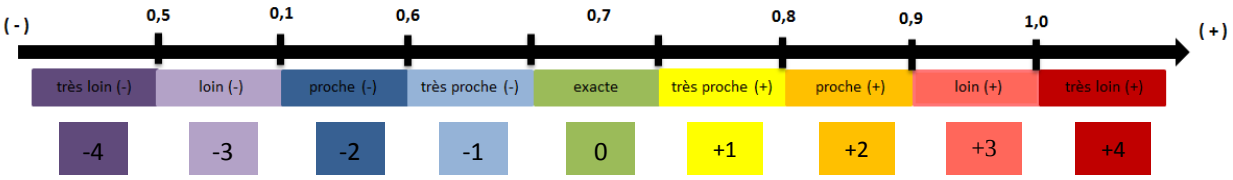
	Tentative	
	D (m)	**V**
B1	0,88 x 0,88	+1
B2	0,89 x 0,89	+1
B3	0,84 0,84	0
B4	0,9 x 0,9	+1
B5	0,84 x 0,84	0
B6	0,89 x 0,89	+1
B7	0,84 x 0,84	0
B8	0,97 x 0,97	+2
B9	0,89 x 0,89	+1
B10	0,85 x 0,85	+1
B11	0,87 x 0,87	+1
B12	0,93 x 0,93	+2
B13	0,82 x 0,82	-1
B14	0,88 x 0,88	+1
B15	0,84 x 0,84	0
B16	0,89 x 0,89	+1
B17	0,89 x 0,89	+1
B18	0,88 x 0,88	+1
B19	0,85 x 0,85	+1

Remarque

- Relativement au groupe précédent, le groupe B affiche de bons résultats.

Tab (16) : Tableau représentant une évaluation des résultats du groupe B, paramètre « Dimension ».

III.1.2.2. Paramètre "**Surface**" de l'élément d'ouverture



Echelle d'évaluation

	Tentative	
	S (m^2)	**V**
B1	0,78	+1
B2	0,8	+2
B3	0,7	0
B4	0,81	+2
B5	0,709	+1
B6	0,795	+1
B7	0,7	0
B8	0,95	+3
B9	0,79	+1
B10	0,72	+1
B11	0,75	+1
B12	0,87	+2
B13	0,68	-1
B14	0,77	+1
B15	0,7	0
B16	0,8	+2
B17	0,788	+1
B18	0,771	+1
B19	0,727	+1

Remarques

- Tous les étudiants ont réussi à travailler avec notre modèle durant la première tentative.

- L'absence de résultats : loin (-), très loin (-), loin (+) ou très loin (+).

- Un quart des étudiants a réussi à obtenir des résultats "exacts" c'est-à-dire identiques à ceux obtenus par l'auteur.

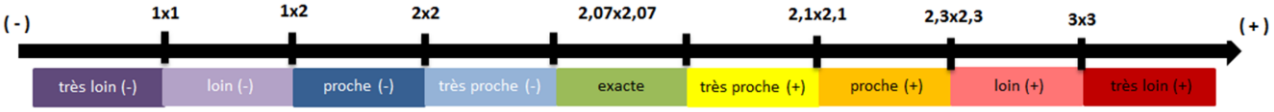
- Deux quarts des étudiants ont obtenu des résultats très proches avec une différence de (0,1 x 0,1) m au maximum.

Tab (17) : Tableau représentant une évaluation des résultats du groupe B, paramètre « surface »

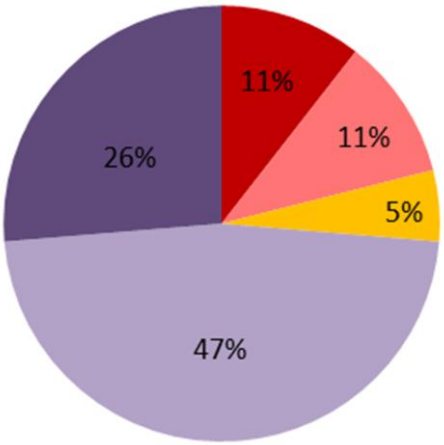
III.1.3. Synthèse de l'évaluation des résultats

III.1.3.1. Paramètre **« Dimensions »** de l'élément d'ouverture

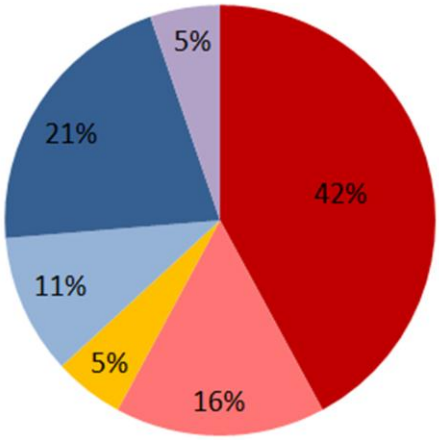
III.1.3.1.1. groupe A



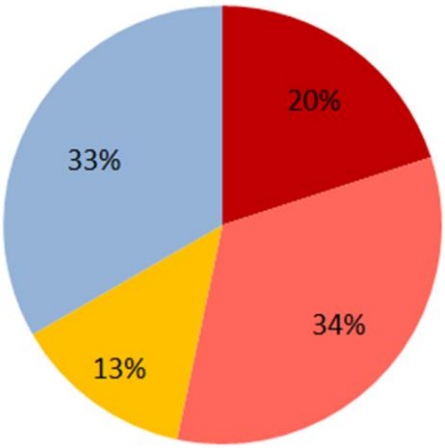
Echelle d'appréciation



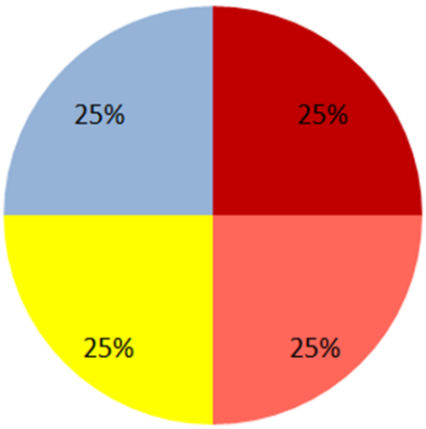
Groupe A, Tentative 1



Groupe A, Tentative 2



Groupe A, Tentative 3



Groupe A, Tentative 4

Fig (52) : Graphes représentant l'évolution des résultats de l'évaluation, Paramètre « Dimensions » pour le groupe A

Interprétation :

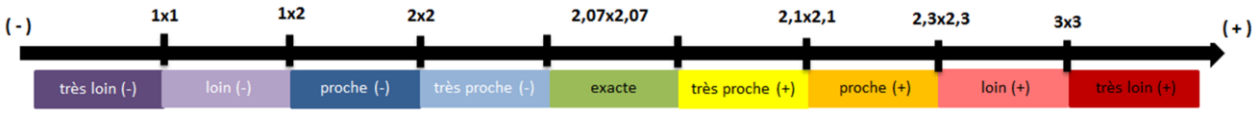
La première tentative : la majorité des étudiants affichent des résultats loin et très loin avec une domination des résultats en dessous de la valeur voulue.

La deuxième tentative : la majorité des étudiants affichent des résultats loin et très loin, mais contrairement à la première tentative, avec une domination des résultats au-dessus de la valeur voulue. De plus, il y'a une amélioration des résultats d'une minorité (11%).

La troisième tentative : augmentation du degré d'atteinte d'une valeur très proche et les résultats" très loin" restent importants.

La quatrième tentative : les résultats sont divisés en deux : D'un côté, très proche divisé aussi en très proche (-) et très proche (+). Dans un autre côté, loin et très loin mais les deux en dessous de la valeur voulue.

III.1.3.1.1. groupe B



Echelle d'évaluation

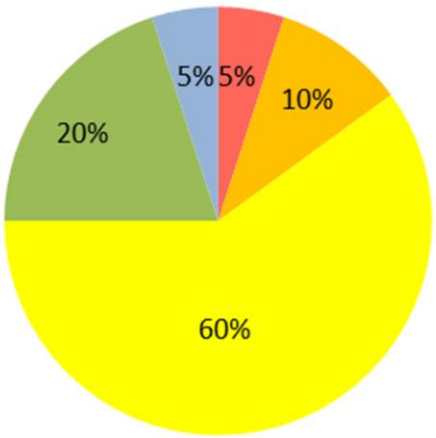


Fig (53) : Graphe représentant l'évolution des résultats de l'évaluation, Paramètre « Dimensions » pour le groupe B

Interprétation :

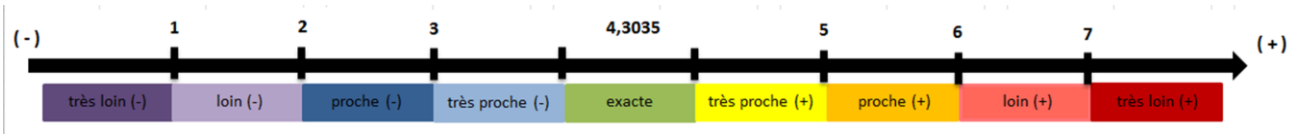
- présence relativement remarquable des résultats exacts.

- domination des résultats très proches (+)

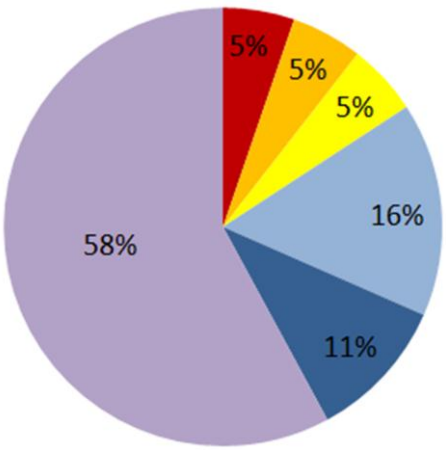
- un tiers du reste des résultats affiche la mention très proche (-) et les deux autres tiers affichent des résultats proche (+)

III.1.3.2. Paramètre **« Surface »** de l'élément d'ouverture

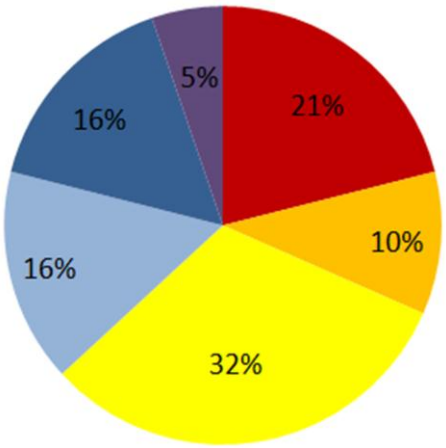
III.1.3.2.1. **G**roupe **A**



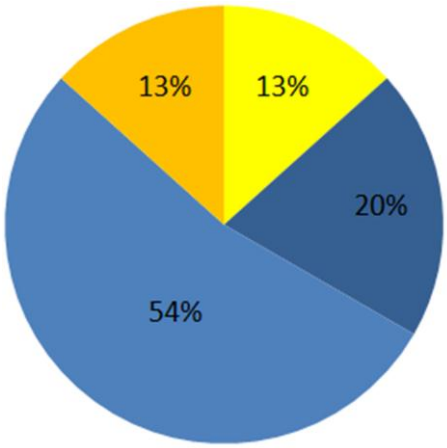
Echelle d'évaluation



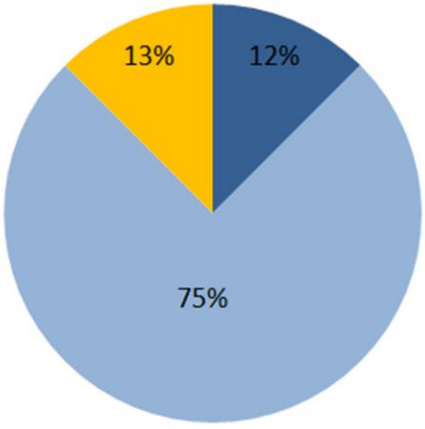
Groupe A, Tentative 1



Groupe A, Tentative 2



Groupe A, Tentative 3



Groupe A, Tentative 4

Fig (54) : Graphes représentant l'évolution des résultats de l'évaluation, Paramètre « Surface » pour le groupe A.

Interprétation :

Première tentative :

- domination presque totale des résultats au-dessus de la valeur voulue.

- les résultats sont en grande partie "très loin".

- contrairement au paramètre dimension, on remarque la présence de résultats très proches dans la première tentative.

Deuxième tentative

- la moitié des résultats sont très proches.

- deux tiers des résultats très proches sont au-dessus de la valeur voulue.

- diminution des résultats très loin.

Troisième tentative :

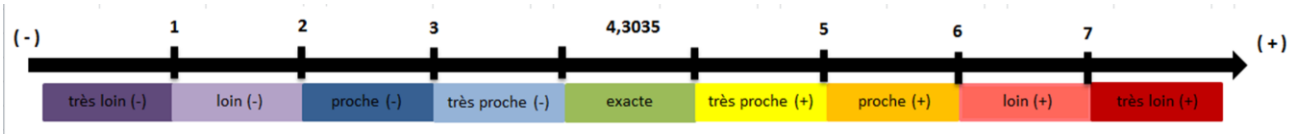
- disparition de tous les résultats loin ou très loin.

- trois quart des résultats sont très proches avec une domination du côté au-dessus de la valeur voulue. Le reste des résultats est divisé de manière égale en deux : proche (-) et proche (+)

Quatrième tentative :

- trois quart des résultats sont très proches et affichent tous des valeurs au-dessus de celle voulue. Le reste des résultats (un quart) restent proches mais divisés en deux : proches (-) et proche (+).

III.1.3.2.2. Groupe **B**



Echelle d'appréciation

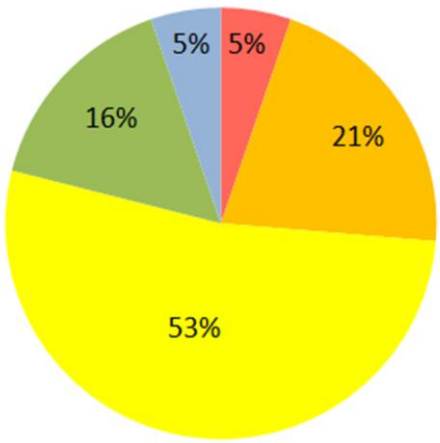


Fig (55) : Graphe représentant l'évolution des résultats de l'évaluation, Paramètre « Surface » pour le groupe B

Interprétation :

- la présence relativement remarquable des résultats exacts.

- la domination des résultats très proches (+).

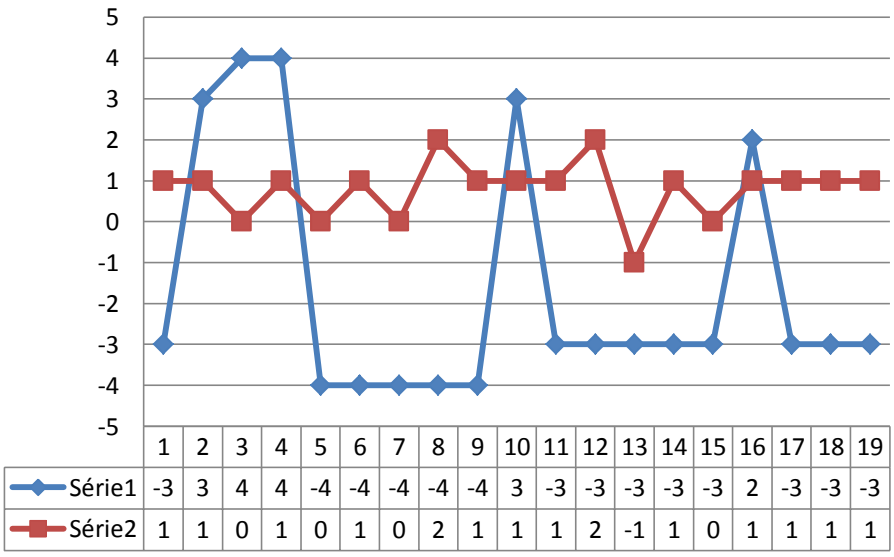
- les résultats proches (+) viennent en deuxième position.

- présence de résultats très loin (+) mais relativement négligeables.

III.2. Rapprochement des résultats

III.2.1. Paramètre « **dimensions** » de l'élément d'ouverture

III.2.1.1. Première tentative



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Série1	-3	3	4	4	-4	-4	-4	-4	-4	3	-3	-3	-3	-3	-3	2	-3	-3	-3
Série2	1	1	0	1	0	1	0	2	1	1	1	2	-1	1	0	1	1	1	1

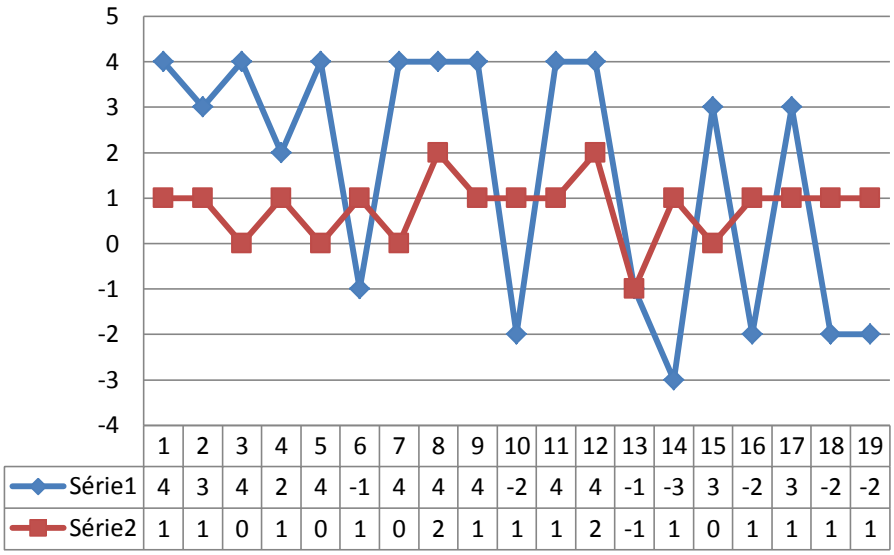
Fig (56) : Courbe de rapprochement entre les résultats de la première tentative des groupes A et B.

Remarque :

- Degré de rapprochement très faible

- la courbe représentant le groupe A est en dessous de celle représentant le groupe B.

III.2.1.2. Deuxième tentative



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Série1	4	3	4	2	4	-1	4	4	4	-2	4	4	-1	-3	3	-2	3	-2	-2
Série2	1	1	0	1	0	1	0	2	1	1	1	2	-1	1	0	1	1	1	1

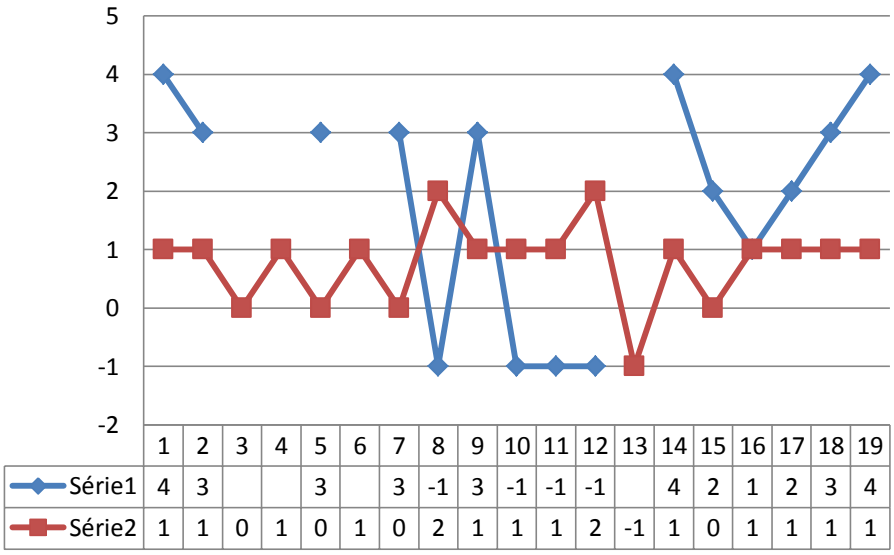
Remarque :

- Degré de rapprochement très faible

- la courbe représentant le groupe A est au-dessus de celle représentant le groupe B.

Fig (57) : Courbe de rapprochement entre les résultats de la deuxième tentative des groupes A et B.

III.2.1.3. Troisième tentative



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Série1	4	3			3		3	-1	3	-1	-1	-1		4	2	1	2	3	4
Série2	1	1	0	1	0	1	0	2	1	1	1	2	-1	1	0	1	1	1	1

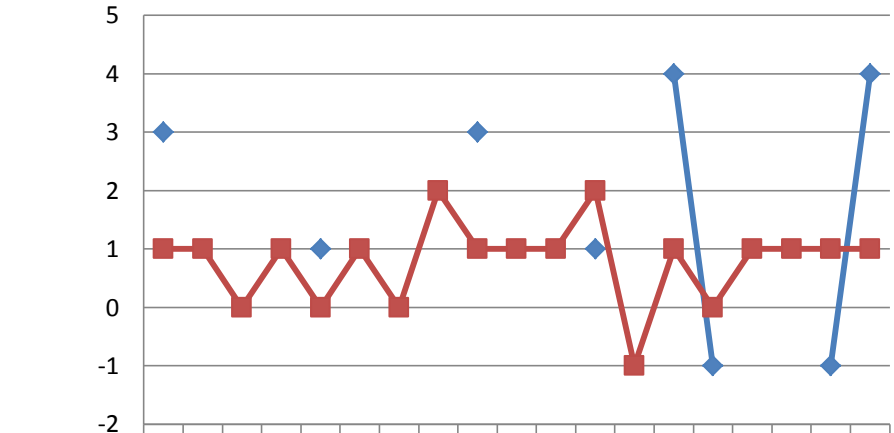
Remarque :

- Degré de rapprochement très faible

- la courbe représentant le groupe A est au-dessus de celle représentant le groupe B.

Fig (58) : Courbe de rapprochement entre les résultats de la troisième tentative des groupes A et B.

III.2.1.4. Quatrième tentative



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Série1	3				1				3			1		4	-1			-1	4
Série2	1	1	0	1	0	1	0	2	1	1	1	2	-1	1	0	1	1	1	1

Remarque :

- Degré de rapprochement très faible

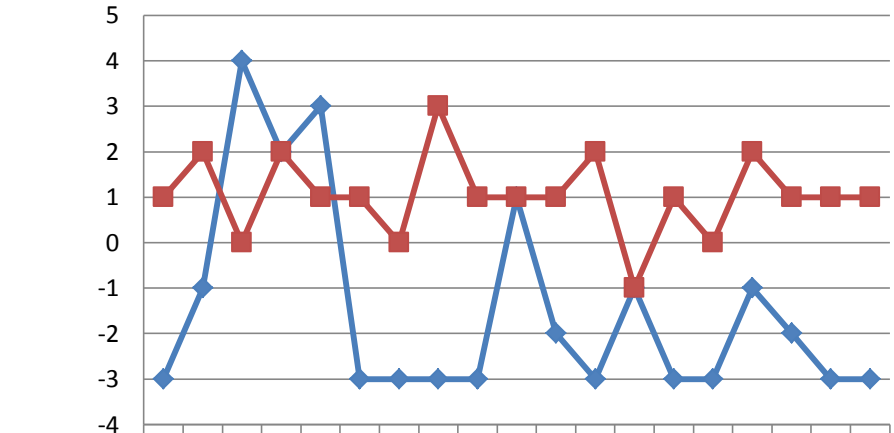
- la courbe représentant le groupe A est divisée en trois parties:

En dessous, superposée et au- dessus.

Fig (59) : Courbe de rapprochement entre les résultats de la quatrième tentative des groupes A et B.

III.2.2. Paramètre « surface » de l'élément d'ouverture

III.2.2.1. Première tentative



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Série1	-3	-1	4	2	3	-3	-3	-3	-3	1	-2	-3	-1	-3	-3	-1	-2	-3	-3
Série2	1	2	0	2	1	1	0	3	1	1	1	2	-1	1	0	2	1	1	1

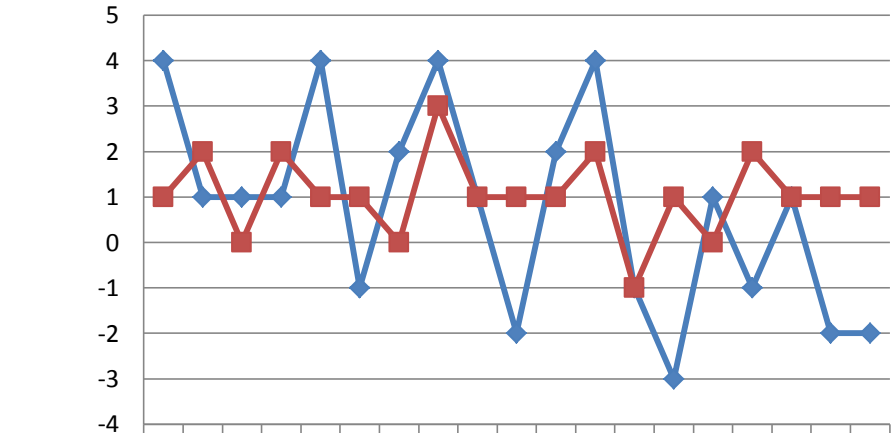
Remarque :

- Degré de rapprochement très faible

- la courbe représentant le groupe A est en dessous de celle représentant le groupe B.

Fig (60) : Courbe de rapprochement entre les résultats de la première tentative des groupes A et B.

III.2.2.2. Deuxième tentative



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Série1	4	1	1	1	4	-1	2	4	1	-2	2	4	-1	-3	1	-1	1	-2	-2
Série2	1	2	0	2	1	1	0	3	1	1	1	2	-1	1	0	2	1	1	1

Remarque :

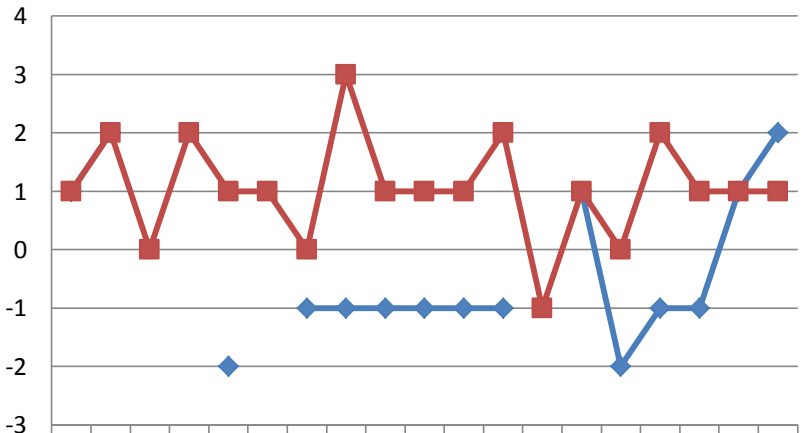
- Degré de rapprochement très faible

- la courbe représentant le groupe A est divisée en trois parties:

En dessous, superposée et au-dessus.

Fig (61) : Courbe de rapprochement entre les résultats de la deuxième tentative des groupes A et B.

III.2.2.3. Troisième tentative



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Série1	1	2			-2		-1	-1	-1	-1	-1	-1		1	-2	-1	-1	1	2
Série2	1	2	0	2	1	1	0	3	1	1	1	2	-1	1	0	2	1	1	1

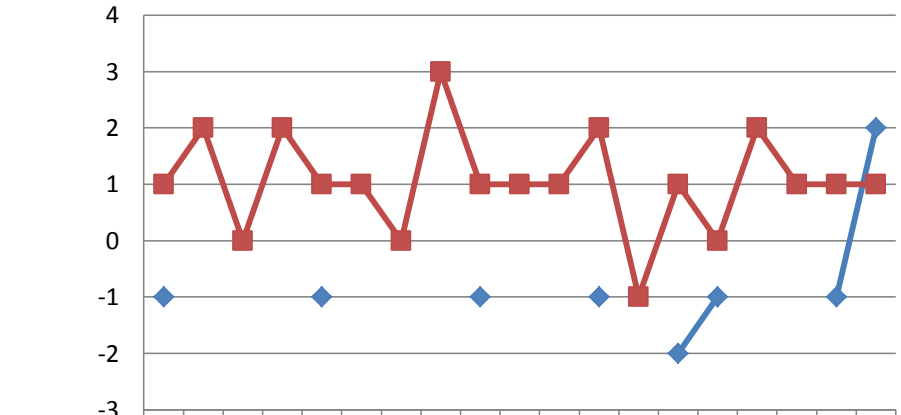
Remarque :

- Degré de rapprochement très faible

- la courbe représentant le groupe A est en dessous de celle représentant le groupe B.

Fig (62) : Courbe de rapprochement entre les résultats de la troisième tentative des groupes A et B.

III.2.2.4. Quatrième tentative



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Série1	-1				-1				-1			-1		-2	-1			-1	2
Série2	1	2	0	2	1	1	0	3	1	1	1	2	-1	1	0	2	1	1	1

Remarque :

- Degré de rapprochement très faible

- la courbe représentant le groupe A est en dessous de celle représentant le groupe B.

Fig (63) : Courbe de rapprochement entre les résultats de la quatrième tentative des groupes A et B.

III.2.3. Récapitulation du rapprochement entre les résultats

	Degré de rapprochement par rapport au paramètre « Dimension »	Degré de rapprochement par rapport au paramètre « Surface »
Tentative 1	**Très faible**	**Très faible**
Tentative 2	**Très faible**	**Moyen**
Tentative 3	**Très faible**	**Très faible**
Tentative 4	**Moyen**	**Très faible**

Tab (18) : Tableau représentant une le rapprochement entre les résultats des deux Groupes A et B.

Remarque :

- Le degré de rapprochement entre les résultats des deux groupes est dans la majorité des cas « très faible » ; cela est dû au fait que chaque outils utilisé se base sur un mode de fonctionnement différent par rapport à l'autre.

- L'existence d'un degré de rapprochement « moyen » ne peut pas être représentative car elle touche, à chaque fois, un seul paramètre pour des tentatives avancées.

IV. Tableau de comparaison montrant l'avantage de MNSIEN par rapport à DIALux

Critères de comparaison		DIALux 4.11.02	MNSIEN
Les données à fournir	**Input 1**	Information générales	Nom du fichier
	Input 2	Insertion des coordonnées géographiques	Insertion des valeurs des angles représentant la hauteur et l'azimut solaire
	Input 3	Géométrie complète de l'espace	Une coupe incluant le mur et la hauteur du point de calcul
	Input 4	Emplacement point de calcul dans les trois dimensions (x, y et z)	Emplacement point de calcul dans les trois dimensions (y et z) et l'angle entre sa normale et la normale du mur
	Input 5	Réglage avant le calcul (types de ciel et d'environnement lumineux)	Une copie des valeurs des cinq coefficients (a, b, c, d, et e) selon le type de ciel choisi
Duré du calcul		quelques secondes au minimum	instantané
Visualisation des résultats		Un passage obligatoire par une dizaine de fenêtres au minimum	Affichage des résultats sur la même fenêtre
Autres différences issues de l'expérience	**Nombre moyen des tentatives**	3,17	1
	Dimension	variée	Carré centré sur le point de calcul
	Surface	Très proche	exacte
	Eclairement	Très proche	exacte

Tab (19) : Tableau représentant une comparaison entre DIALux4.11.02 et MNSIEN

CONCLUSION

Contrairement aux chapitres précédents, le présent chapitre a vu la participation des concepteurs (étudiants/architectes) dans l'élaboration du son contenu.

Durant cette opération de mise en application de notre modèle numérique dans une situation réelle de conception des ouvertures, ce dernier a montré des avantages directs sur l'aide et la facilitation de l'opération de dimensionnement d'un élément d'ouverture à partir de données non-précises d'un espace de forme non-définie. L'aide apportée peut être remarquée au niveau de la diminution du nombre de tâtonnements entre « essai-erreur » présent dans la plupart des cas de conception. Cette amélioration en matière d'itération a été suivie par une garantie d'un niveau d'éclairement nécessaire pour le bon déroulement de l'activité à l'intérieur de l'espace en cours de conception, ce qui laisse le libre choix pour le concepteur d'adopter la forme de l'espace qui accueillera cet élément d'ouverture.

La comparaison entre l'utilisation du modèle développé et d'un logiciel de simulation directe de la lumière naturelle a montré que le premier permet la diminution du nombre d'étapes de travail et du nombre de données à fournir lors de la simulation (voir le tableau de comparaison) ; cet avantage encouragera l'utilisation et l'emploi de notre modèle numérique durant le travail de conception de nouveaux projets/espaces et précisément dès la première phase (phase d'esquisse), lorsque les grandes lignes ne sont pas encore faites.

En proposant ce modèle numérique, on espère introduire une vraie aide à la conception des éléments d'ouverture dans l'espace architecturale construit et répondre ainsi aux intentions des concepteurs en matière d'éclairage naturel dès les prémisses de la conception.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La notion de simulation fait partie intégrante de la conception architecturale depuis sa création [Lebahar, 1983]. Si les méthodes conventionnelles/classiques de simulation de l'éclairage ont montré une certaine efficacité dans l'élaboration des nouveaux projets d'architecture, c'est parce qu'elles ont plus de points positifs que négatifs. La proposition ou l'adoption d'une approche inverse pour la simulation de l'éclairage vient donc compléter et résoudre les problèmes/lacunes qui peuvent apparaitre dans les situations et même parfois, les situations exceptionnelles. Notre travail de recherche constitue donc un lien entre ces deux méthodes afin de répondre le mieux aux intentions des concepteurs/architectes en matière de conception des éléments d'ouverture.

Le choix de l'ambiance lumineuse comme intention de conception est une conséquence du rôle important que joue ce paramètre dans l'identification du projet architectural, car la lumière est l'un des éléments permettant à la fois de voir le projet depuis l'extérieur et de voir l'environnement depuis l'intérieur [Donnadieu, 2002] ; cet élément permet aussi d'assurer la perméabilité du projet à la lumière naturelle et donc d'assurer le confort visuel pour l'occupant, ce qui est un facteur déterminant pour la réussite de tout projet.

La simulation de l'éclairage naturel s'appuie sur la modélisation de la lumière pour montrer de manière virtuelle l'interaction entre l'environnement lumineux extérieur et le bâtiment/projet architectural. Cela est fait par la simulation de la position du soleil et de la luminance du ciel ainsi que par l'ajout des dimensions temporelle et géographique [Miguet, 2000] [Fontoynont, 1998]. L'accès aux résultats de la simulation peut être assuré en utilisant des modèles dits "photoréalistes" permettant d'avoir une vue générale proche du réel de l'ambiance lumineuse conçue (ce modèle est le plus utilisé par les architectes) ou par des modèles dits "photométriques" dont l'exactitude des résultats est supérieure à celle des modèles précédents sans être directement exploitables, car ils doivent être à chaque fois/périodiquement interprétés (ce modèle est utilisé dans les cas d'études de détails précis de la répartition quantitative de la lumière dans un espace donné). [Tourre, 2007]

Certains architectes renommés ont montré à travers les premières esquisses de leurs projets, un certain niveau de maitrise de la lumière naturel lui permettant d'intégrer cet élément parmi les générateurs primaires de la configuration spatiale de leurs projets. Cependant et comme conséquence de la complexité qui caractérise ce phénomène physique

(variation continue en matière de quantité et de qualité de la lumière présente dans l'environnement lumineux extérieur), l'application d'une telle démarche est souvent considérée comme très difficile par la majorité des concepteurs, ce qui les a poussé à donner plus d'importance au côté morphique lors des premières phases de conception. [Tourre, 2007] Pour cela, les architectes ont souvent recours aux logiciels de simulation de l'ensoleillement afin de tester l'efficacité des systèmes d'éclairage qu'ils envisagent de mettre en œuvre. Par leur apport indéniable en matière de gain de temps, de facilité de travail, ces logiciels ont fini par occuper une place non négligeable dans une démarche de conception par intention d'ambiance lumineuse. Cependant, ces outils sont en grande partie basés sur des méthodes directes de simulation de l'éclairage qui nécessitent souvent une définition complète et détaillée de la géométrie du bâtiment en cours de conception pour pouvoir ensuite être utilisés. Un aperçu sur ces outils montre que leur objectif consiste surtout à donner aux concepteurs le moyen de tester les solutions qu'ils proposent mais, force est de constater qu'ils ne constituent pas un générateur de solutions à la conception des systèmes d'éclairage dans un processus qui traite de l'ambiance lumineuse dès ses premières phases.

L'adoption de l'approche inverse de simulation de l'éclairage naturel peut être considérée comme une réponse à ce problème ; cette méthode s'appuie sur l'intention du concepteur en matière de quantité ou de qualité de lumière souhaitée pour ensuite proposer les solutions permettant la concrétisation de cette intention (configuration spatiale, dimensions et/ou position des ouvertures). Des logiciels développés sur la base de cette approche peuvent donc être vus comme plus adaptés à la prise en compte des intentions d'ambiance lumineuse au cours des premières phases de la conception architecturale. [Houpert, 2003]

Les logiciels permettant une simulation inverse de l'éclairage sont mis au point dans des laboratoires et ne sont pas destinés au commerce et leurs nombre et leurs types sont plutôt restreints, ce qui constitue un frein à leur utilisation et les a rendu inaccessibles pour la majorité des concepteurs [Houpert, 2003]

Dans ce cadre, nous avons proposé un modèle numérique permettant le dimensionnement des ouvertures par une simulation inverse de la lumière naturelle. Cela constitue la principale contribution de ce travail de recherche. Par cet acte, on espère avoir répondu aux problèmes cités et donner plus d'importance aux avantages de la simulation dans le domaine de l'éclairage. Le tout pour arriver à une prise en compte optimale de la contrainte d'éclairage naturel dès les prémisses de la conception architecturale.

Le développement de 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. Les résultats du travail de validation ont montré des avantages du modèle développé quant à la précision du calcul et à la garantie d'un niveau d'éclairement toujours au-dessus de celui exigé dans l'espace. La mise en œuvre du modèle développé dans l'expérience a permis d'en faire ressortir d'autres avantages en matière de facilité d'utilisation et de diminution du nombre de tâtonnements constatés dans les cas d'utilisation des logiciels de simulation directe de l'ensoleillement.

L'évaluation des pertinences et des potentialités du modèle numérique développé nous autorisent à penser qu'il est performant, qu'il peut être opérationnel et qu'il peut être utilisé par les étudiants/architectes dès leur première phase de conception des nouveaux projets d'architecture et qu'il constituera une vraie aide à la définition des dimensions des éléments ouvertures, ce qui évitera la production des situations d'éclairage aléatoire et aboutira à une optimisation du confort dans les espaces conçus ; c'est le principal objectif de ce travail de recherche.

A travers ce modèle numérique de simulation inverse de l'éclairage naturel, on espère également permettre un accès à de nouveaux outils de conception architecturale assistée par ordinateur, un nouvel outils de conception des ouvertures qui tient compte des besoins du monde actuel en matière d'écologie, de bioclimatique et en matière d'architecture plus respectueuse de l'environnement ; cela permettra de bénéficier le mieux et le plus des opportunités offertes par la nature, précisément les apports gratuits et propres qu'offre chaque jour le soleil, l'une des principales source de vie sur terre.

PERSPECTIVES

Les travaux de ce mémoire, nous amènent à proposer deux sortes de possibilités futures de recherches : des perspectives à court terme consistant à repousser les limites du présent travail et des perspectives à long terme pouvant faire appel à une collaboration avec d'autres domaines de recherche afin d'étendre le champ d'application.

La principale perspective à court terme est le développement d'une application/logiciel informatique incluant comme base de données notre modèle numérique présenté et testé durant ce travail de recherche. Une application ayant sa propre interface utilisateur adaptée au niveau des apprenants et qui sera plus facilement accessible par la majorité des concepteurs.

La deuxième perspective est d'enrichir la base de données à inclure pour arriver à une simulation inverse annuelle de l'ensoleillement prenant en compte l'environnement extérieur naturel et bâti avec toutes leurs propriétés géométriques et photométriques.

L'autre perspective à court terme, c'est d'inclure le côté qualitatif au moment de l'expression des intentions par le concepteur, c'est-à-dire, le résultat de toutes les interactions entre la lumière et toutes les composantes de l'espace ce qui permettra d'assurer à la fois, la quantité de lumière nécessaire au déroulement de l'activité par rapport au type du projet et aussi une qualité spatiale nécessaire pour le confort psychologique des occupants et qui prend en compte la sensibilité de l'œil humain.

A long terme, nous souhaitons faire une collaboration avec d'autres disciplines scientifiques pour intégrer d'autres phénomènes physiques comme le thermique, l'énergétique et autres pour donner plus de globalité aux résultats de calcul.

ANNEXE

ANNEXE

Annexe A

Natures de la lumière naturelle.

Optique géométrique : la lumière est un ensemble de rayons.

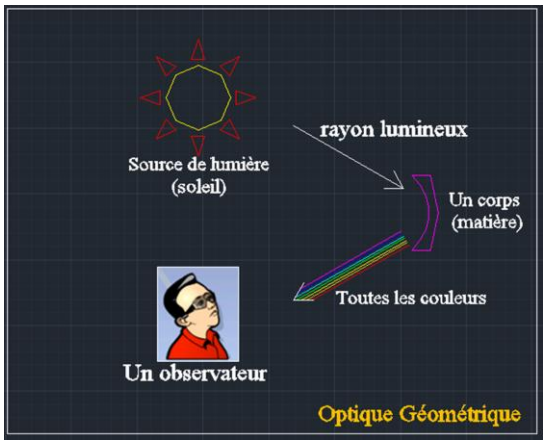


Figure (A1) : Schéma montrant le comportement de la lumière dans l'optique géométrique.

Source : dessin fait par l'auteur à l'aide du logiciel Autocad, Autodesk (2012)

Optique ondulatoire : la lumière est une électromagnétique.

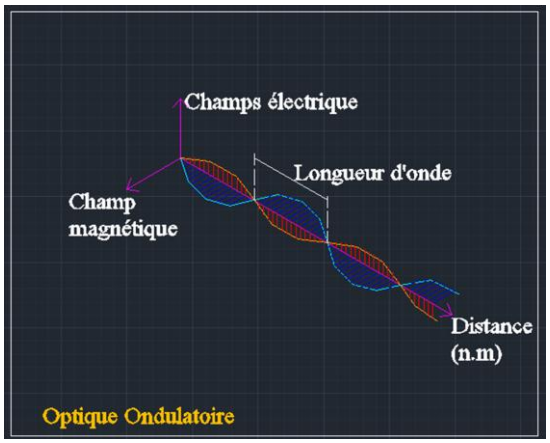


Figure (A.2) : Schéma montrant le comportement de la lumière dans l'optique ondulatoire.

Source : dessin fait par l'auteur à l'aide du logiciel Autocad, Autodesk (2012)

Optique quantique : la lumière est un flux continu de photons.

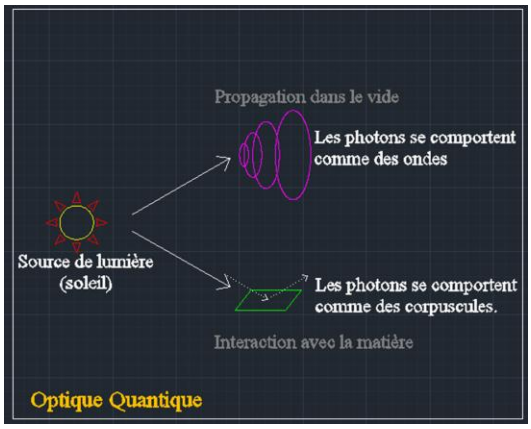


Figure (A3): Schéma montrant le comportement de la lumière dans l'optique quantique.

Source : dessin fait par l'auteur à l'aide du logiciel Autocad, Autodesk (2012)

Types de ciel

La Commission Internationale de l'Eclairage a publié 15 types de ciel standard. [CIE S011, 2003] Les lettres a, b, c, d et e sont des coefficients dont les valeurs participent à la caractérisation d'un type de ciel donnée :

Type	Caractérisation	Graduation		Indicatrices		
		a	b	c	d	e
1	Ciel CIE Standard Overcast Sky. Forte graduation de la luminance vers le zénith. uniformité azimuthale.	4	- 0.7	0	-1	0
2	Ciel couvert. Forte graduation de la luminance vers le zénith. Luminosité légèrement supérieure vers le soleil.	4	- 0.7	2	-1.5	0.15
3	Ciel couvert. Graduation zénithale modérée. uniformité azimuthale.	1.1	- 0.8	0	-1	0
4	Ciel couvert. Graduation zénithale modérée, Graduation légère vers le soleil.	1.1	- 0.8	2	-1.5	0.15
5	Ciel couvert. Uniformité totale.	0	-1	0	-1	0
6	Ciel partiellement nuageux. Graduation zénithale nulle. Graduation légère vers le soleil.	0	-1	2	-1.5	0.15
7	Ciel partiellement nuageux. Graduation zénithale nulle. Zone circumsolaire plus lumineuse.	0	-1	5	2.5	0.3
8	Ciel partiellement nuageux. Graduation zénithale nulle. Couronne solaire distincte.	0	-1	10	-3	0.45
9	Ciel partiellement nuageux. Le soleil est totalement masqué.	-1	- 0.55	2	-1.5	0.15
10	Ciel partiellement nuageux. Zone circumsolaire plus lumineuse.	-1	- 0.55	5	-2.5	0.3
11	Ciel bleu laiteux. Couronne solaire distincte.	-1	- 0.55	10	-3	0.45
12	Ciel CIE Standard Clear Sky. Ciel bleu sans nuage faiblement pollué.	-1	- 0.32	10	-3	0.45
13	Ciel CIE Standard Clear Sky. Ciel bleu sans nuage fortement pollué.	-1	- 0.32	16	-3	0.3
14	Ciel sans nuage. Large couronne solaire.	-1	- 0.15	16	-3	0.3
15	Ciel sans nuage bleu laiteux. Large couronne solaire.	-1	- 0.15	24	-2.8	0.15

Tableau (A1) : Tableau regroupant les quinze types de ciel standard.
Source : Chain, (2004)

L'interaction avec des surfaces étanches à la lumière (non-transparentes)

Absorption

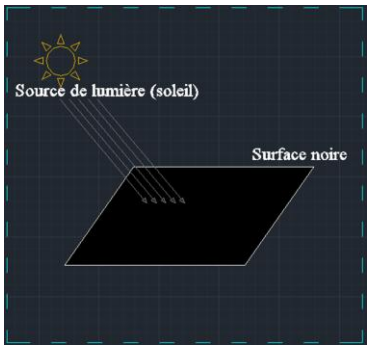


Figure (A3) : Absorption maximale, surface noire. **Source :** auteur

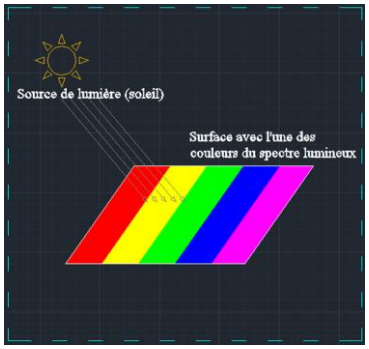


Figure (A4) : Absorption partielle, couleurs du spectre. **Source :** auteur

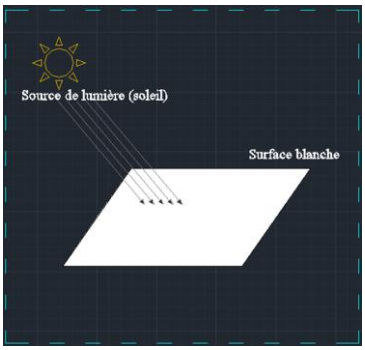


Figure (A5) : Absorption minimale, surface blanche. **Source :** auteur

Réflexion

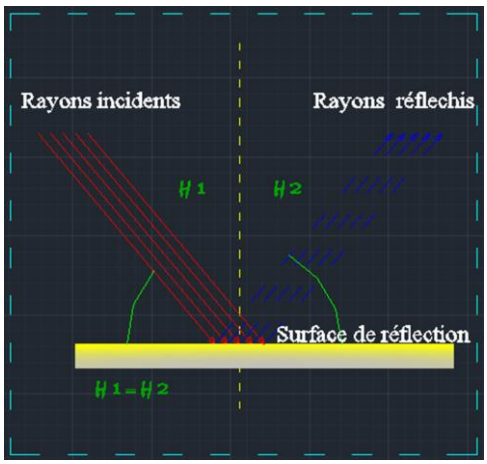


Figure (A6): Schéma montrant la réflexion spéculaire. **Source :** auteur

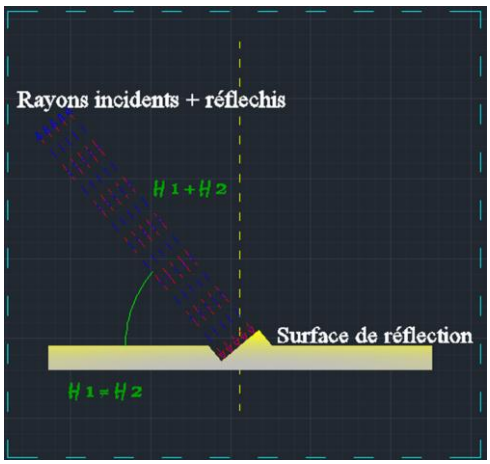


Figure (A7) : Schéma montrant la réflexion diffuse parfaite. **Source :** auteur

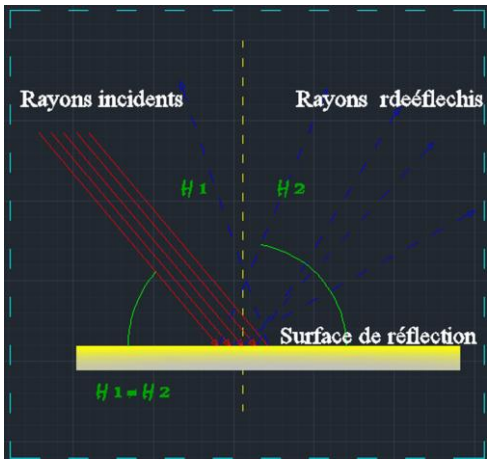


Figure (A8) : Schéma montrant la réflexion diffuse quelconque. **Source :** auteur

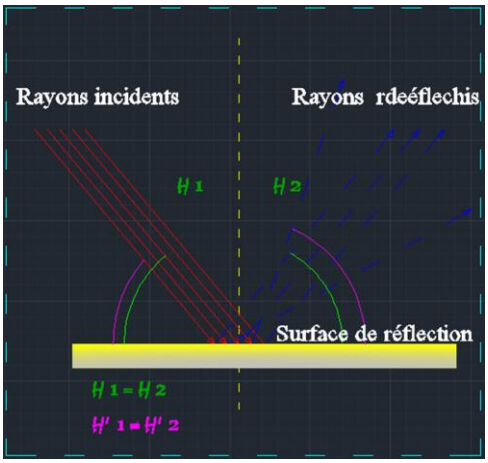


Figure (A9) : Schéma montrant la réflexion mixte. **Source :** auteur

Réfraction

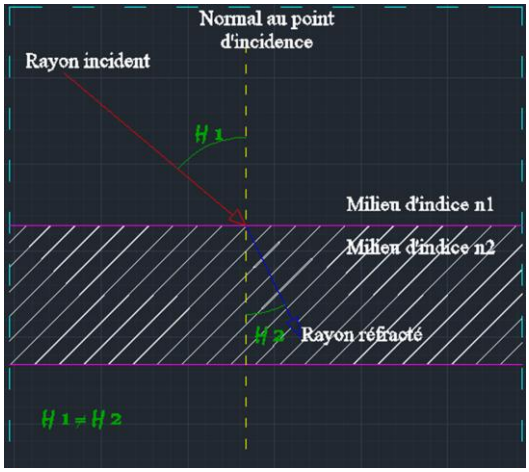


Figure (A10): Schéma montrant la réfraction.

Diffraction

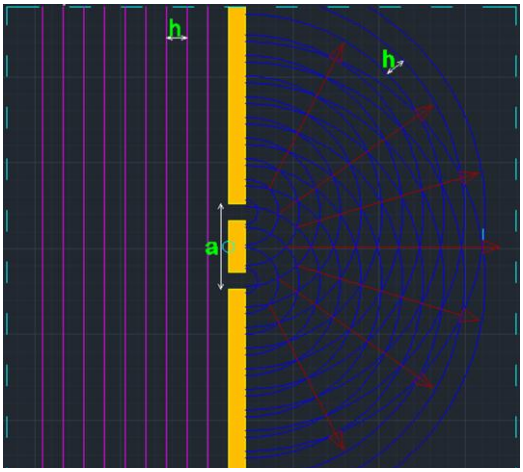


Figure (A11) : Schéma montrant la diffraction. **Source :** auteur

Polarisation

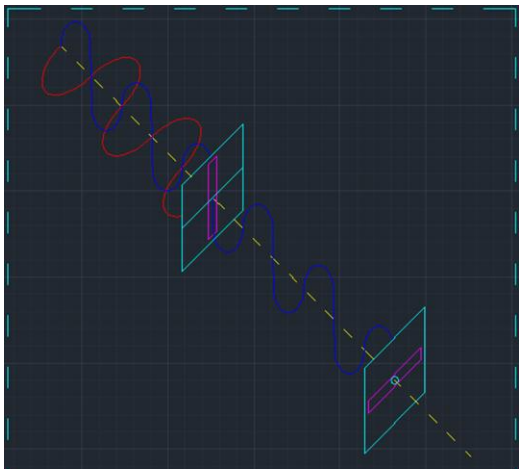


Figure (A12): Schéma montrant la polarisation rectiligne. **Source :** auteur

Unités de la lumière naturelle

Grandeurs	Unités		Terminologie anglo-saxonne	
	Energétiques (e)	Lumineuses (v)	(e)	(v)
Flux Φ (transporté par un faisceau)	Watt (**W**)=**J.S^{-1}**	Lumen (**lm**)	Radians power	Luminous power
Luminance L (d'un pinceau de rayons) =flux par unité d'étendue géométrique	Watt par mètre carré et par stéradian **W.m^{-2}.sr^{-1}**	Candela par mètre carré **cd.m^2 = lm.m^2.sr^{-1}**	Radians	Luminance
Eclairement E (d'une surface réceptrice) =flux reçu par unité de surface	Watt par mètre carré **W.m^{-2}**	Lux ou lumen par mètre carré **lx = lm.m^2**	Irradiance	illuminance
Emittance & Exitance M (d'une surface émettrice) = flux quittant un élément de surface, par unité d'aire	Emittance Watt par mètre carré **W.m^{-2}**	Lux ou lumen par mètre carré lx = **lm.m^{-2}**	Radians exitance (radiosity)	Luminosity
Intensité I (d'une source) flux émis par unité d'angle solide.	Watt par stéradian **W.sr^{-1}** (W)=J.S^{-1}	Candela (**cd**) = **lm.sr^{-1}**	Radians intensity	Luminous intensity
Facteur de Lumière du Jour FLJ (d'un point donnée de l'espace)	Pourcentage (%)	Pourcentage (%)	/	/

Tableau (A2) : Différentes grandeurs métriques utilisées, leurs unités radiométriques et photométriques. **Source :** Miguet (2000)

Annexe B

Exemples de travail avec les logiciels de simulation directe de l'éclairage naturel.

Les étapes du travail avec DIALux 4.11.0.2

Téléchargement :

La taille relativement petite du ficher comportant le logiciel "232,9 MB" facilite le téléchargement de ce dernier pour, pratiquement, tous débit Internet existant en Algérie.

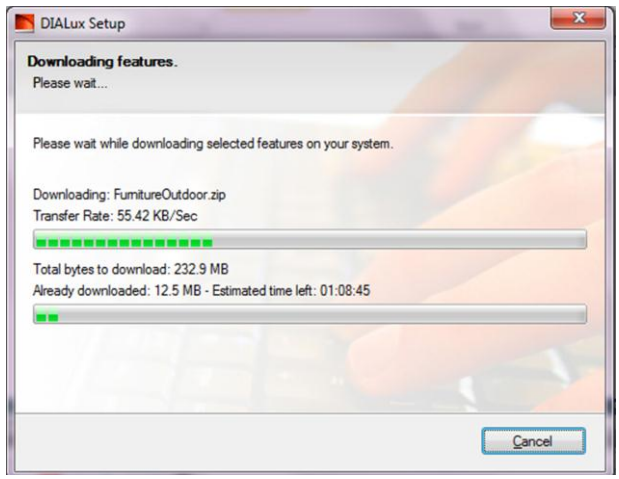


Figure (A13) : l'étape du téléchargement du logiciel depuis le site officiel du propriétaire.

Source : Photo obtenue l'aide de la technique « imprimer l'écran » sur micro-ordinateur de l'auteur.

Installation :

Le logiciel DIALux est caractérisé par une opération d''installation relativement facile, car il s'agit de faire une série de cliques sur "suivant" depuis le commencement jusqu'à la fin de l'installation qui dure quelques minutes.

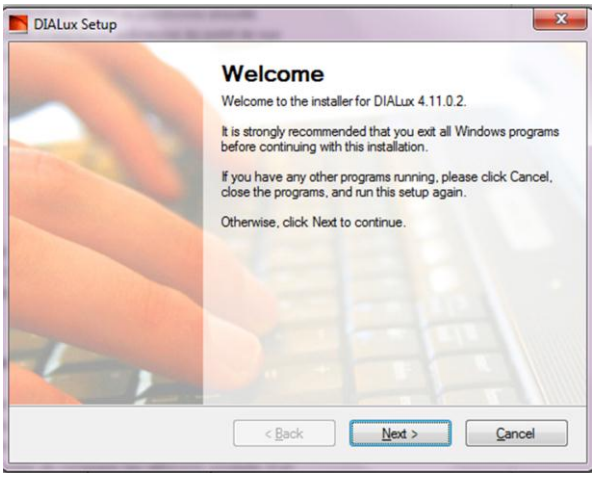


Figure (A14) : Etape d'installation du logiciel DIALux 4.11.0.2.

Source : Auteur.

Démarrage

Il y a la possibilité de créer un nouveau projet, donc faire de la modélisation géométrique et il y aussi la possibilité d'importer des fichiers (DXF + DWG) réalisés dans d'autres logiciels et programmes informatiques.

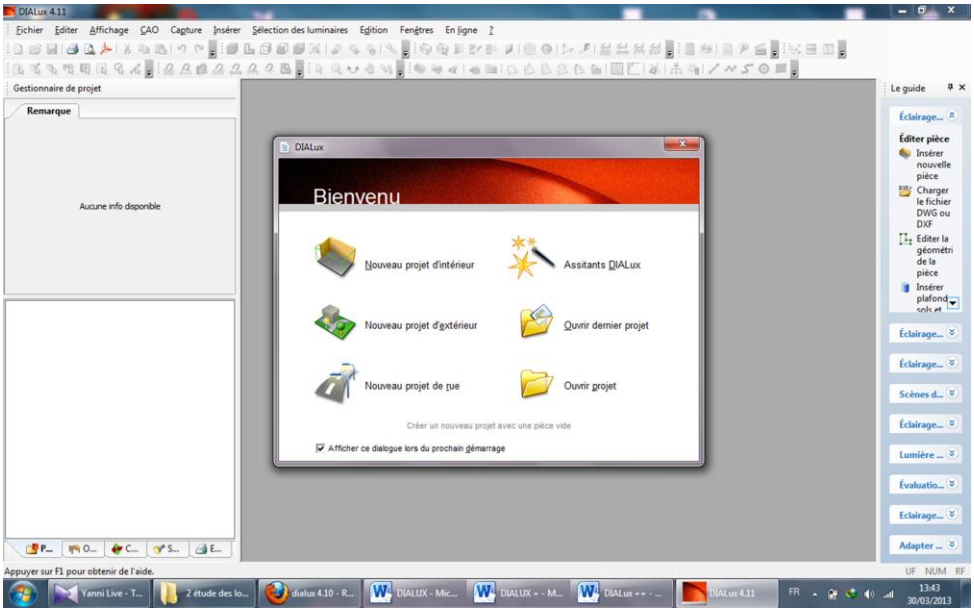


Figure (A15) : Etape démarrage du logiciel DIALux 4.11.0.2.
Source : Auteur.

Dimensionnement

Indication des dimensions : longueur, largeur et hauteur de la pièce souhaitée si le choix est fait sur la modélisation géométrique.

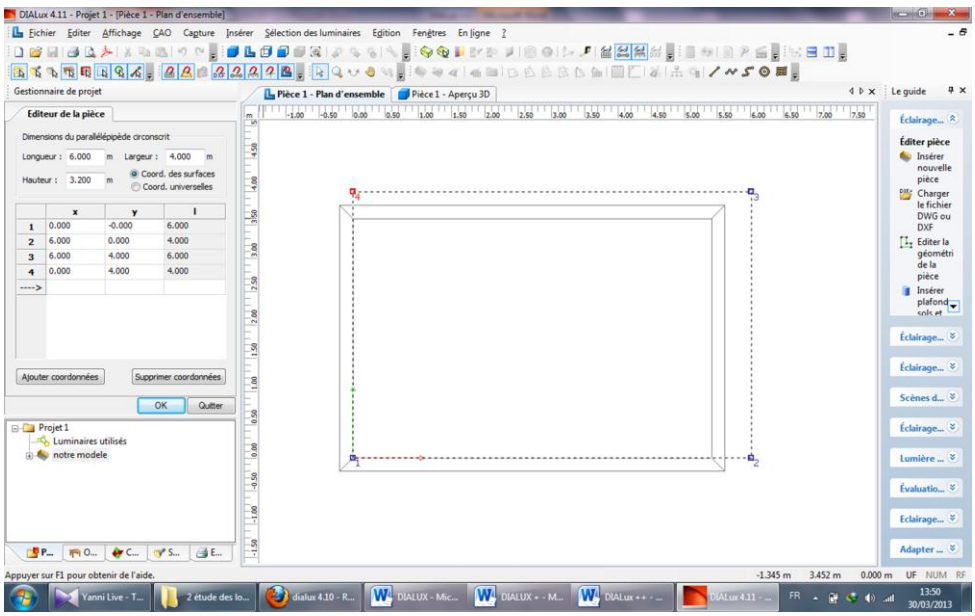


Figure (A16) : Etape du dimensionnement du logiciel DIALux 4.11.0.2
Source : Auteur.

Insertion

Il s'agit d'insertion des ouvertures (portes et fenêtres) ainsi que d'éléments de décoration intérieurs ou extérieurs.

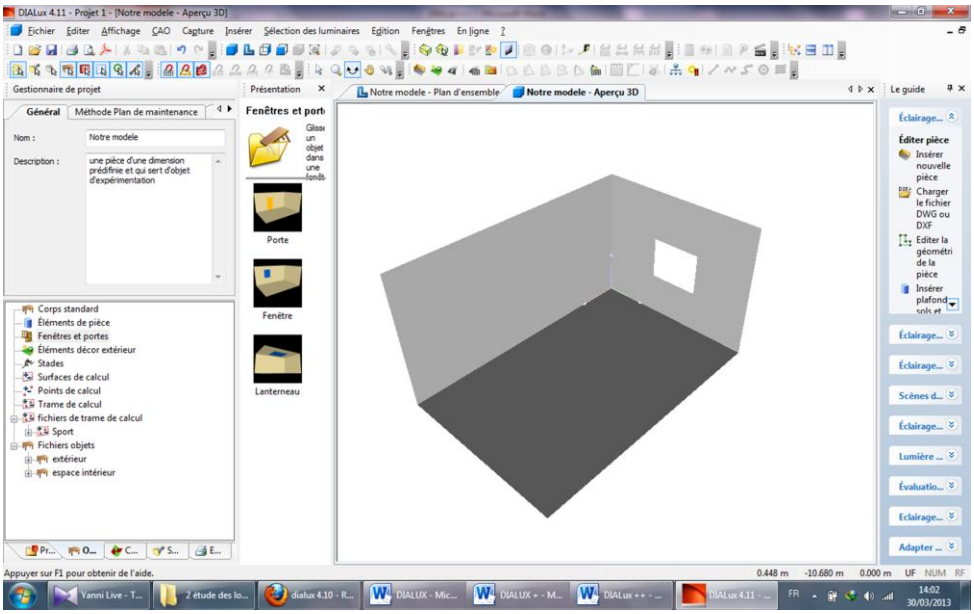


Figure (A17) : Etape d'insertion des ouvertures. **Source :** Auteur.

Choix des textures

Il s'agit de choisir des textures pour les trois composantes de l'espace, cela parmi ceux disponibles dans la bibliothèque des matériaux intégrés dans le logiciel ou en important d'autres textures mais en indiquant leurs degré de réflexion.

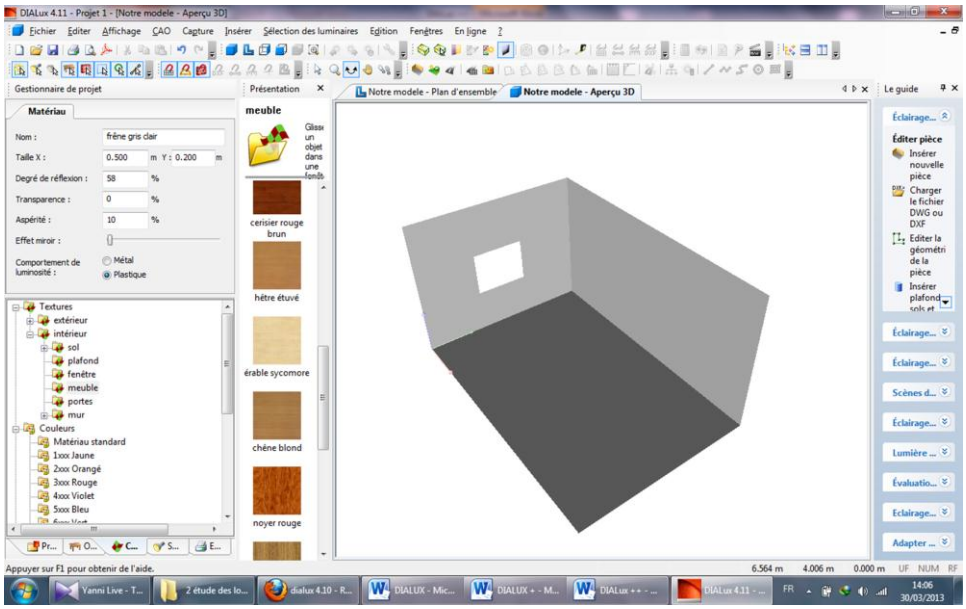


Figure (A18) : Etape d'insertion des textures. **Source :** Auteur.

Editer la localisation et autres réglages avant le calcul

Le choix se fait entre les villes et endroits intégrés dans la base de données du logiciel ou en indiquant les coordonnées géographiques souhaitées.

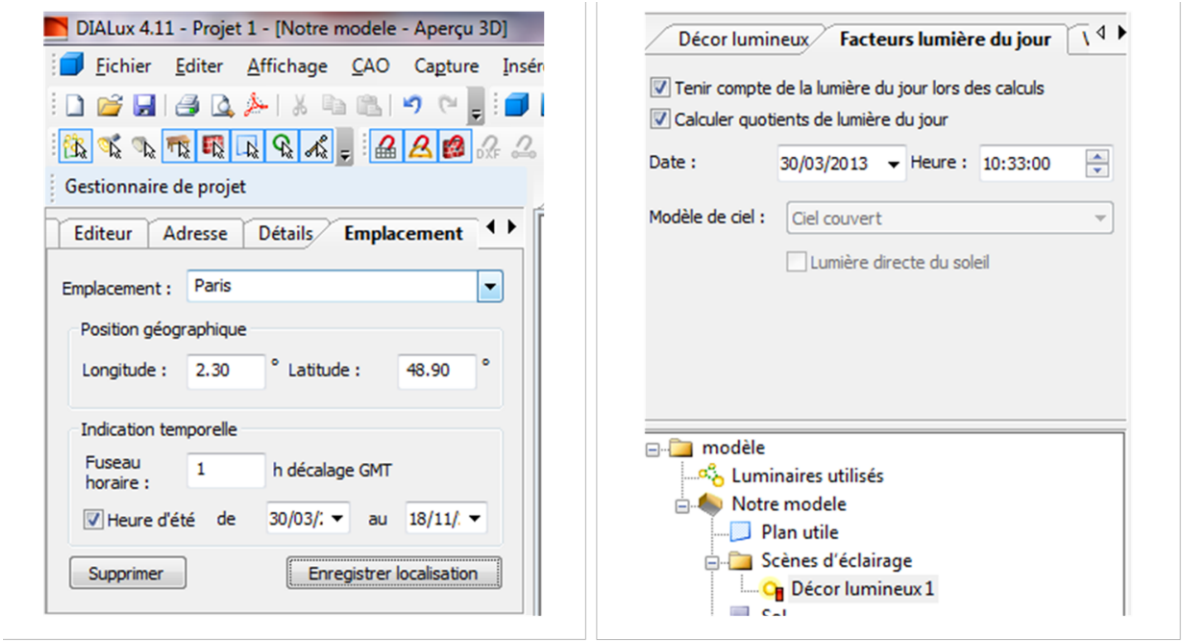


Figure (68) : Etape de choix de la localisation. **Source :** Auteur.

Visualisation des résultats du calcul : Le résultat du calcul peut être représenté selon plusieurs versions :

- Synthèse d'image (photoréalisme)

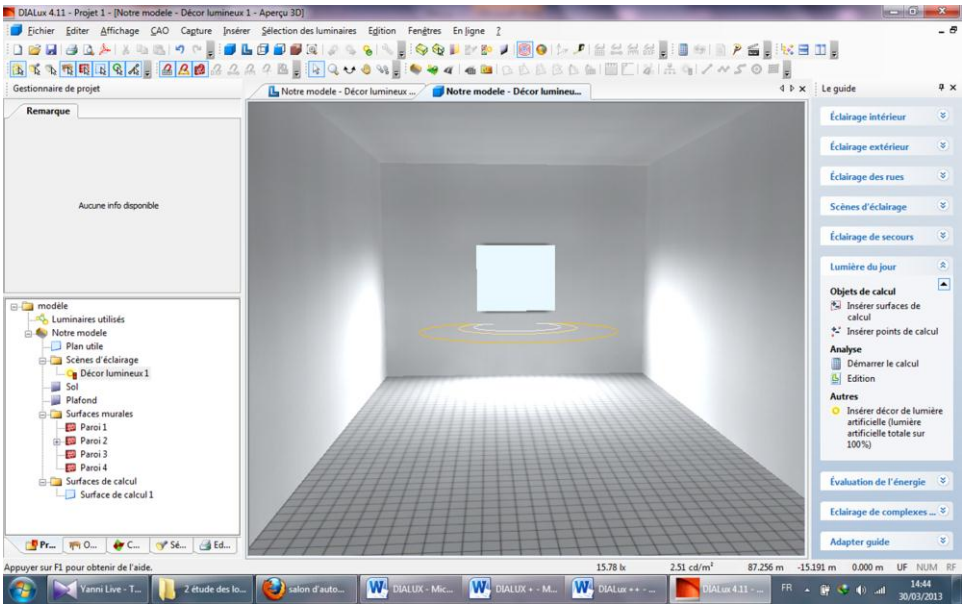


Figure (A20) : Etape de visualisation des résultats. **Source :** Auteur.

- Représentation fausses-couleurs

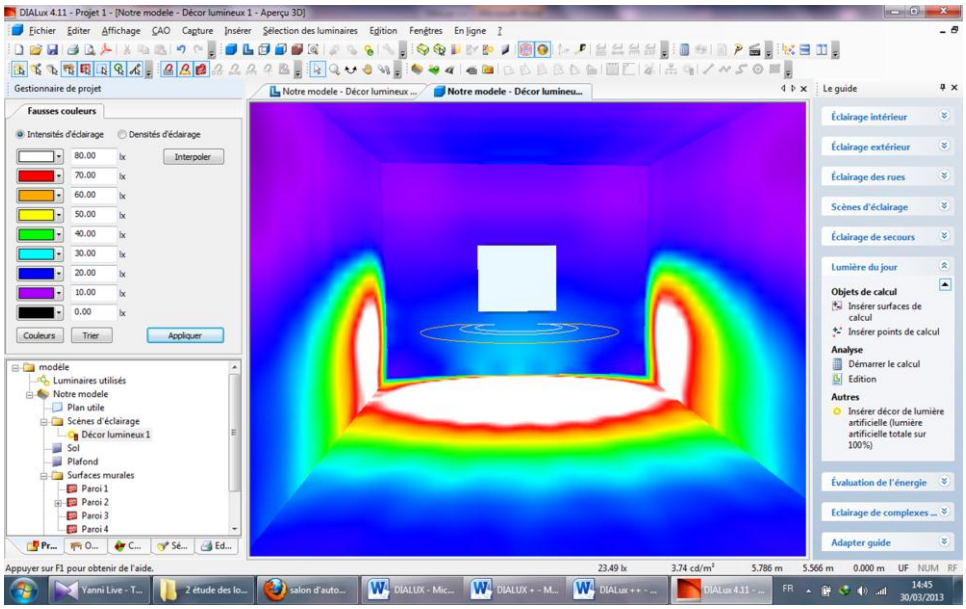
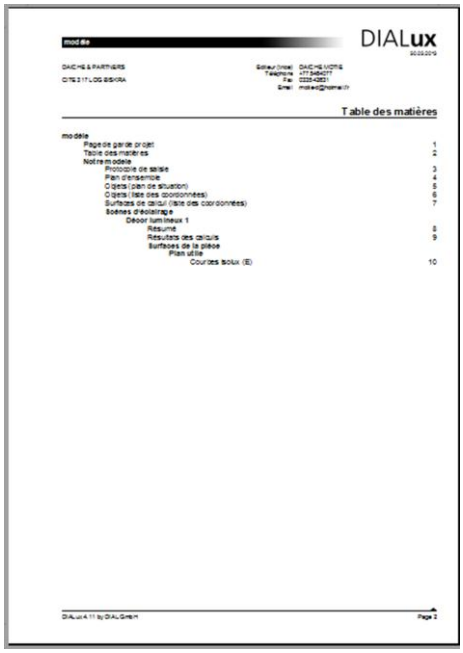


Figure (A21) : Etape de visualisation des rendus. **Source :** Auteur.

Documentation

La possibilité de choisir ce qui est souhaitable à voir dans la partie documentation.



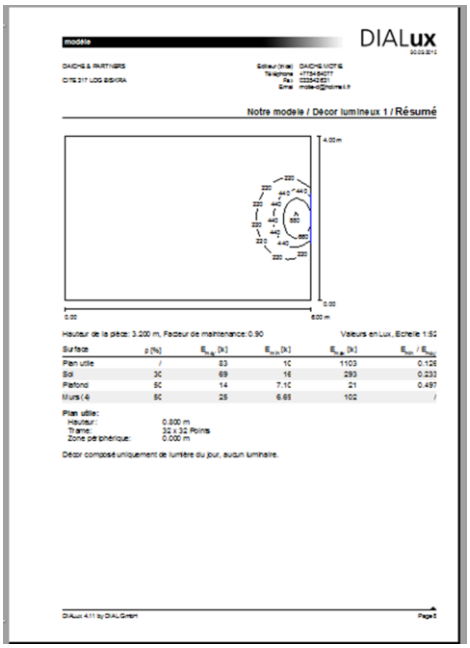


Figure (A22) : Etape de visualisation de la documentation. **Source :** Auteur.

Les étapes du travail avec "ECOTECT V 5.50"

Téléchargement

- La possibilité de téléchargement de la version d'essai.
- La possibilité de téléchargement gratuit pour les étudiants.

Figure (A23) : Etape du téléchargement du logiciel depuis le site officiel du propriétaire. **Source :** auteur.

Page de démarrage :

Dans cette page, est indiqué le nom et le type de la version, une présentation du logiciel ainsi qu'une idée générale sur ces fonctionnalités.

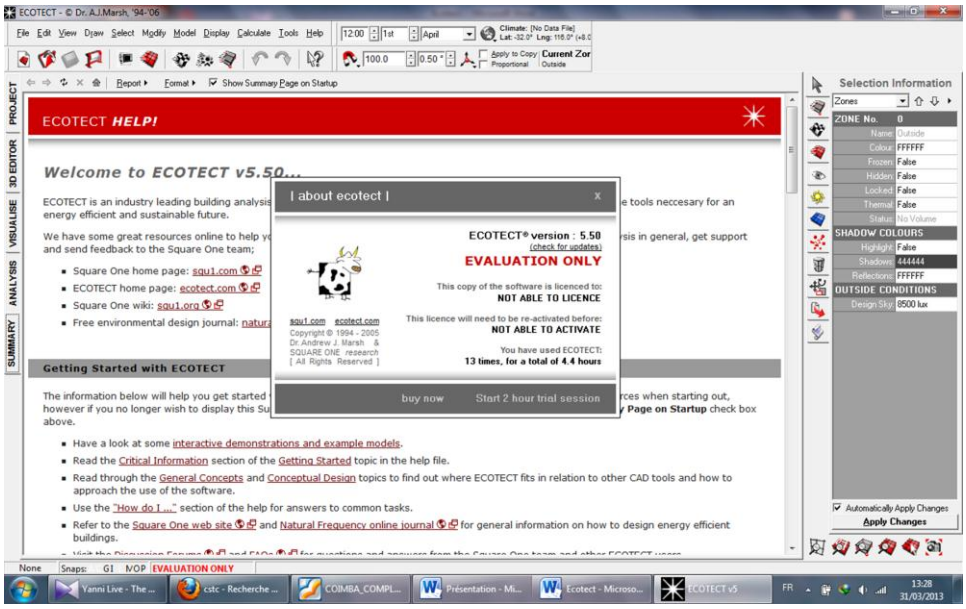


Figure (A24) : Page de démarrage d'ECOTECT v5.50 **Source :** auteur

PROJECT ou « projet » :

Dans cette première phase de travail, des informations sur le projet (son nom, genre et sa destination ainsi que son emplacement géographique) sont à indiquer.

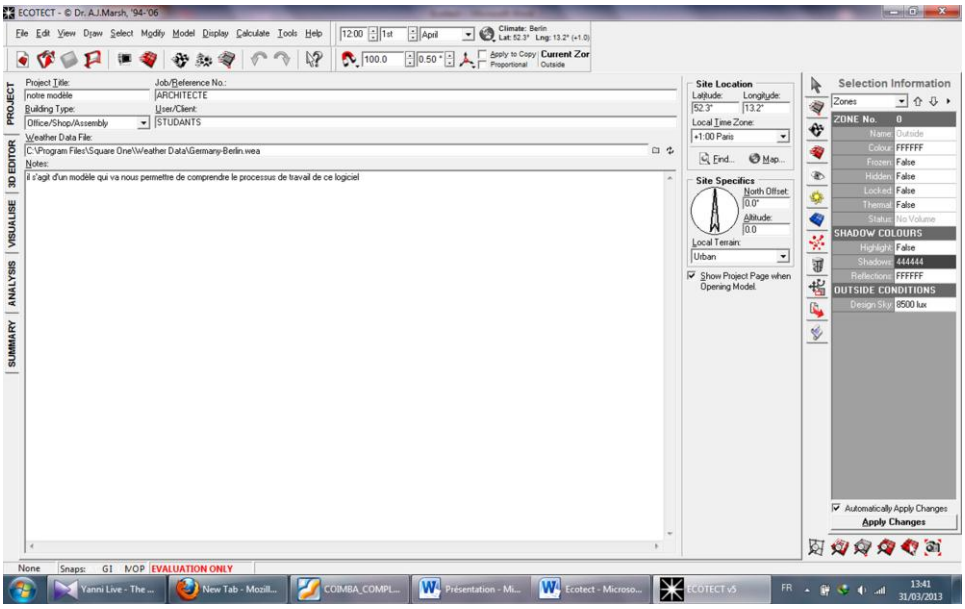


Figure (A25) : Etape descriptive du projet. **Source :** auteur

3D Editor :

Dans cette phase, il est possible de tracer et / ou construire des espaces, voire des bâtiments de manière créative ou en se basant sur des fichiers DWF ou DWG importés depuis d'autres logiciels.

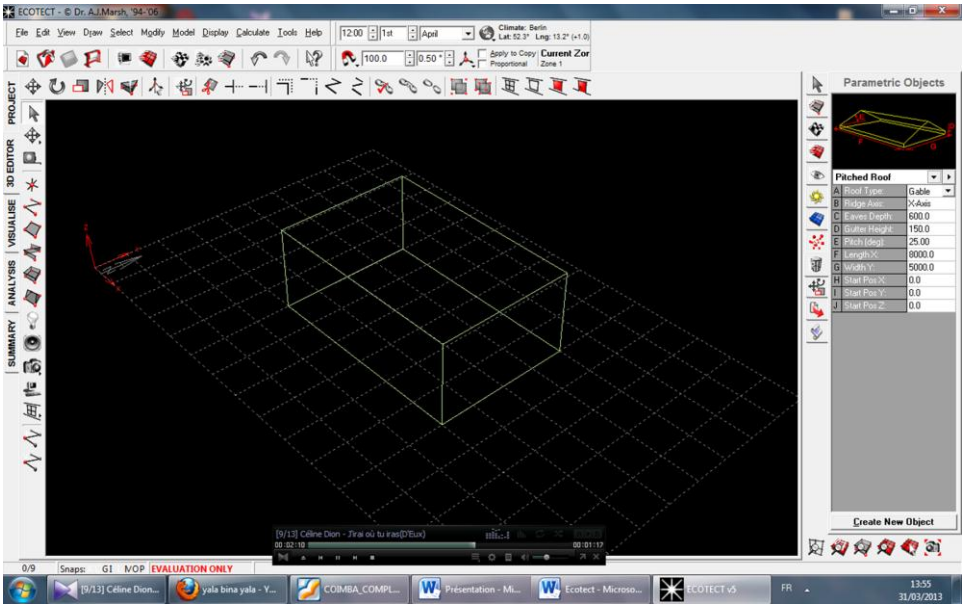


Figure (A26) : Etape de modélisation géométrique. **Source :** auteur

L'ajout des ouvertures :

La possibilité de manipulation de l'emplacement de l'ouverture dans la fenêtre 3d lors et après l'ajout de l'ouverture.

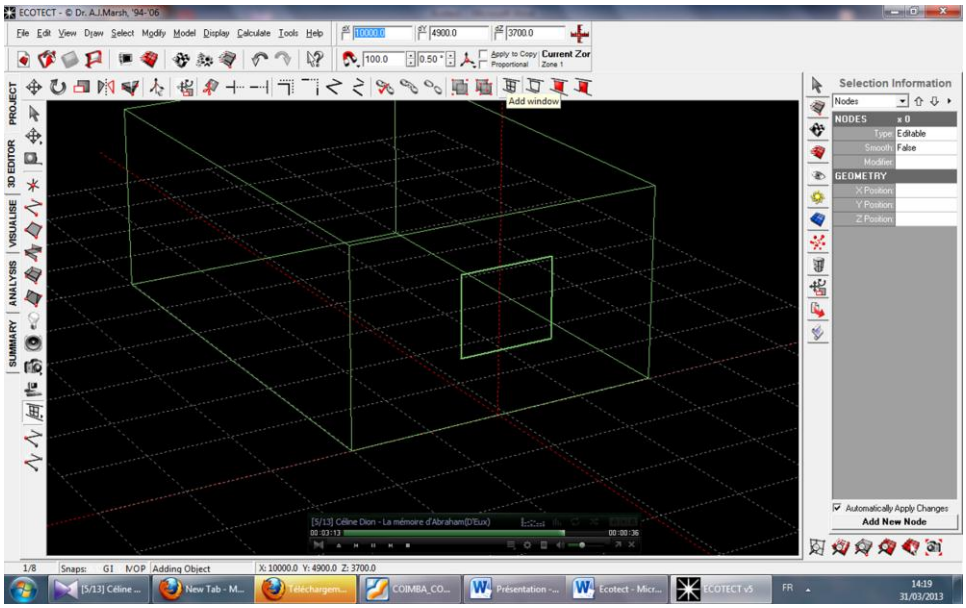


Figure (A27) : Etape d'insertion des ouvertures. **Source :** auteur

Visualisation :

Après avoir terminé la modélisation géométrique, une possibilité de visualisation de l'ensemble du travail fait depuis l'intérieur ou l'extérieur permet d'avoir une idée sur le degré de satisfaction de ce qui est fait.

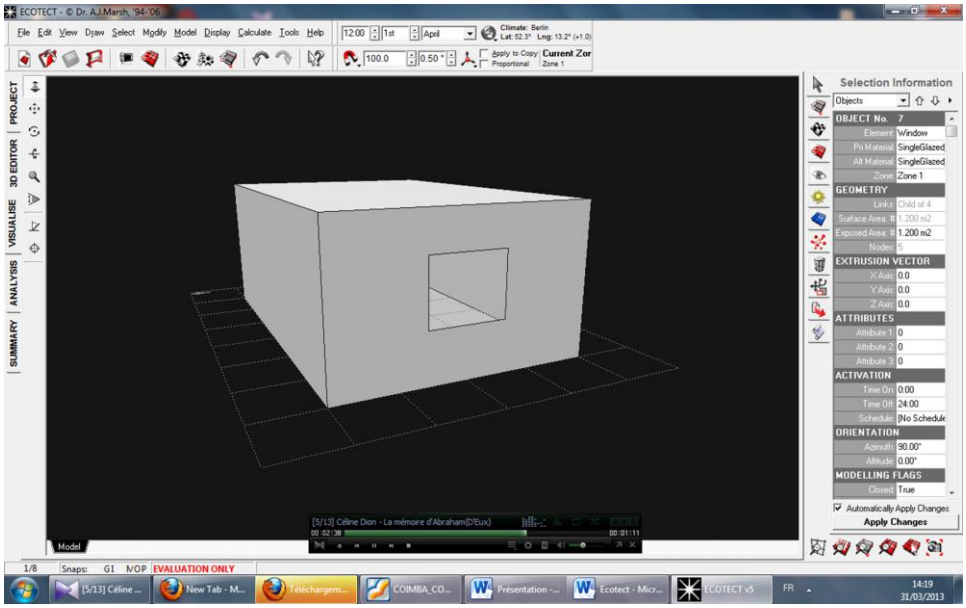


Figure (A28) : Etape de visualisation de l'espace construit. **Source :** auteur

Réglages avant le Calcul

-Il s'agit de cocher ce qui est à prendre en compte lors du calcul comme la course du soleil, l'ombre, etc…

-Il s'agit aussi de préciser la surface sur laquelle sera concentré le calcul :

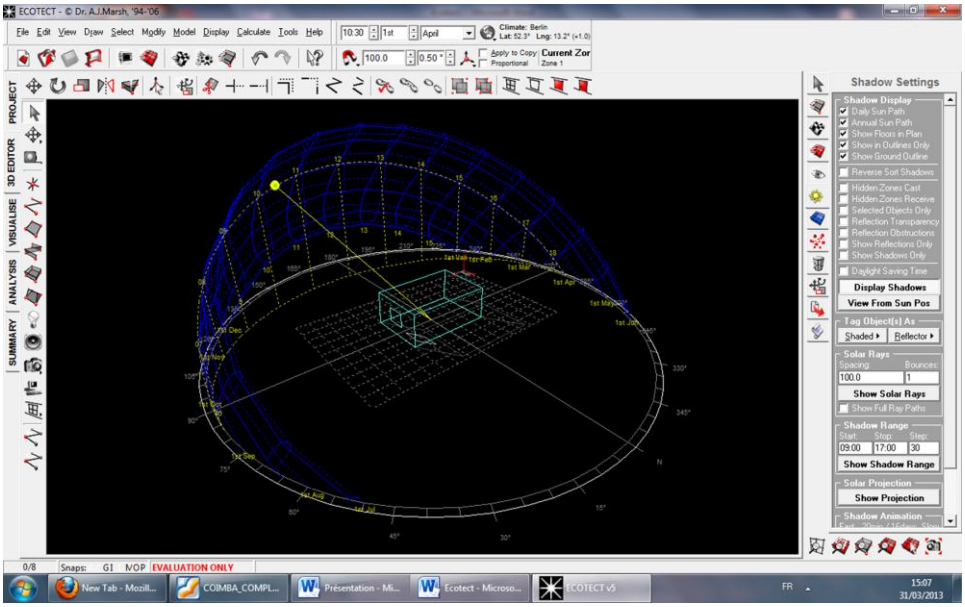


Figure (A29) : Etape de visualisation de l'espace par rapport à la position du soleil. **Source :** auteur

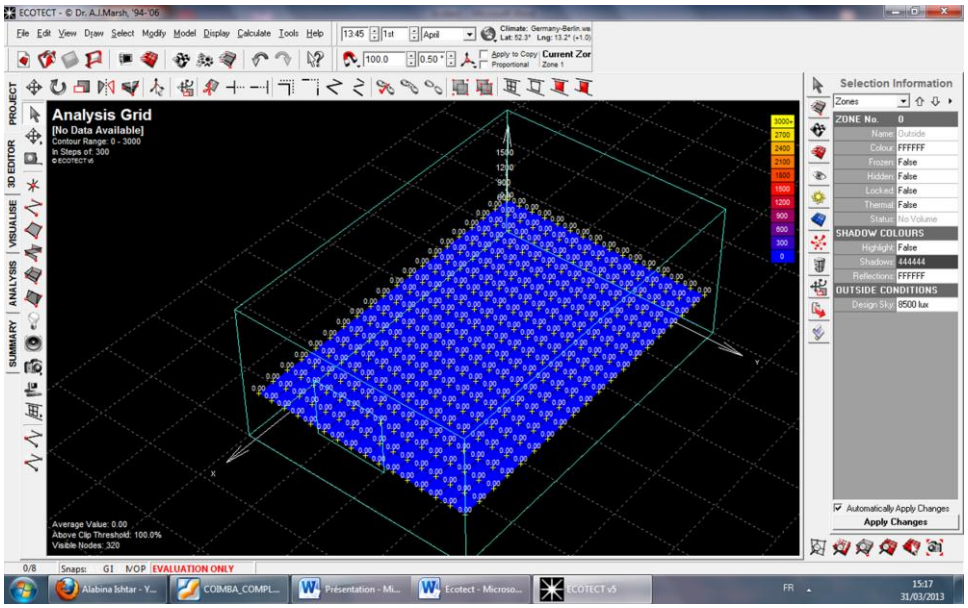


Figure (A30) : Etape de visualisation de la grille de calcul. **Source :** auteur

Autres réglages avant le Calcul :

Par rapport à DIALux 4.11.0.02, plusieurs paramètres sont -de manière obligatoire- à fixer avant le lancement du calcul.

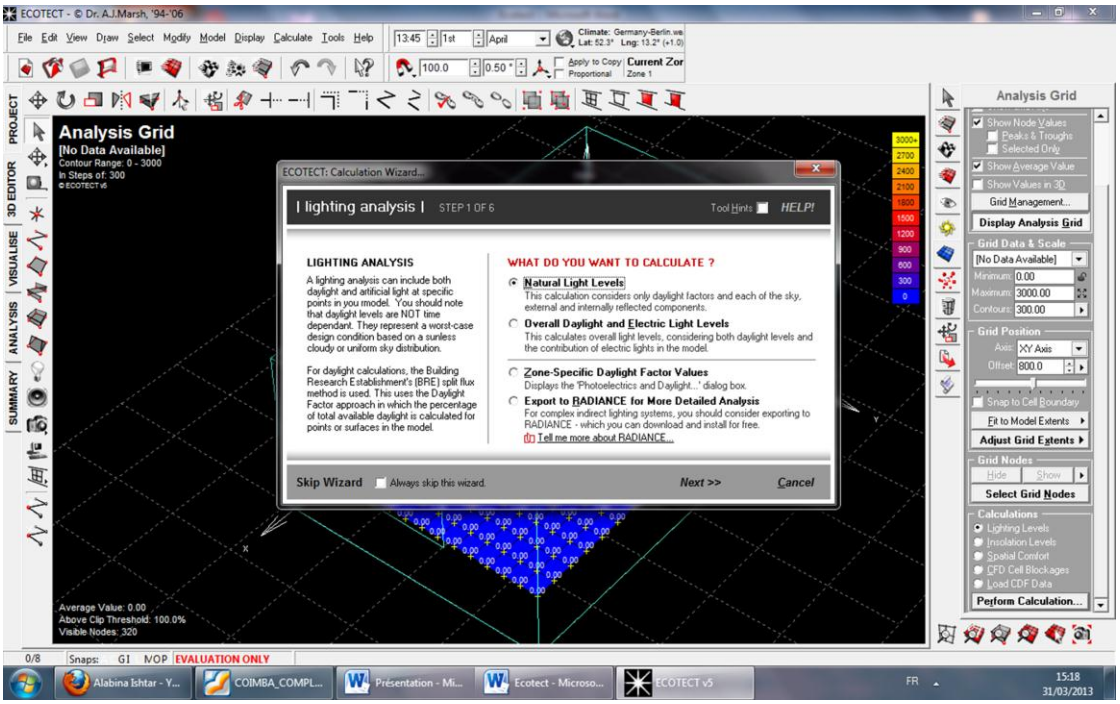


Figure (A31) : Etape de réglage avant le calcul. **Source :** auteur

Visualisation des résultats du Calcul

- L'espace vu de l'extérieur avec son orientation par rapport à la course apparente du soleil.
- L'espace vu de l'intérieur avec les courbes isométriques et le rendu fausses-couleurs ainsi que la tache solaire correspondant à la date et heure indiquées.

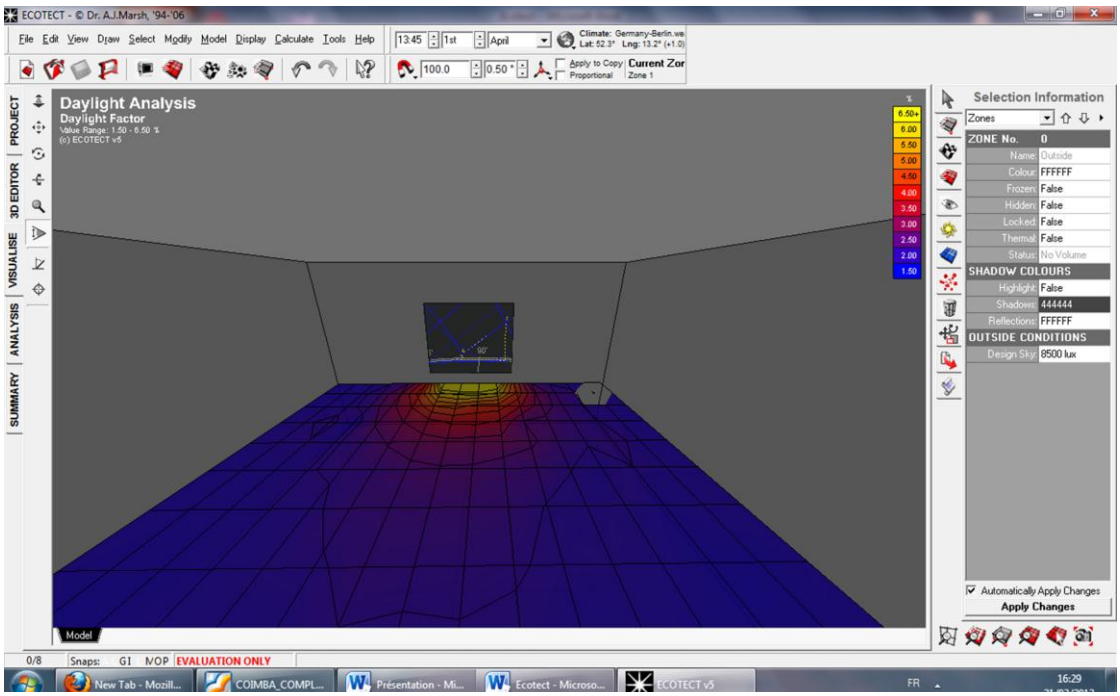


Figure (A32) : Possibilités de visualisation des résultats de calcul. **Source :** auteur

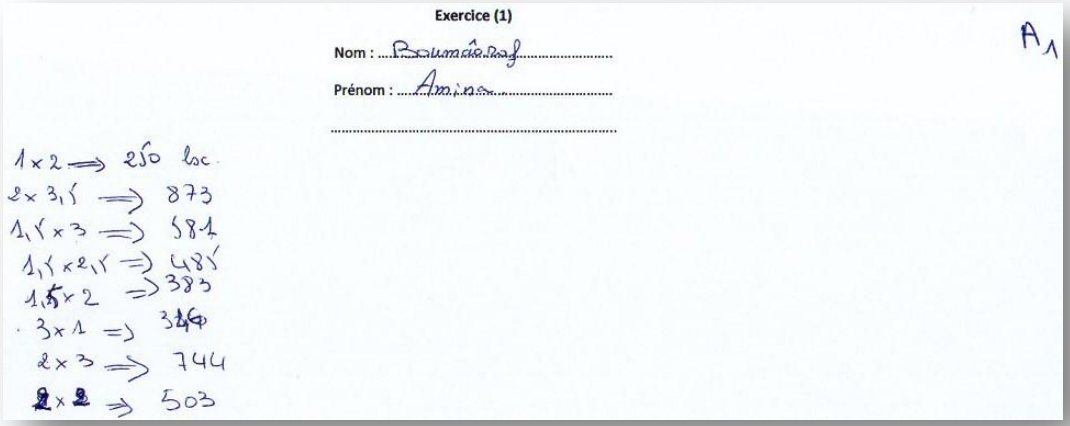
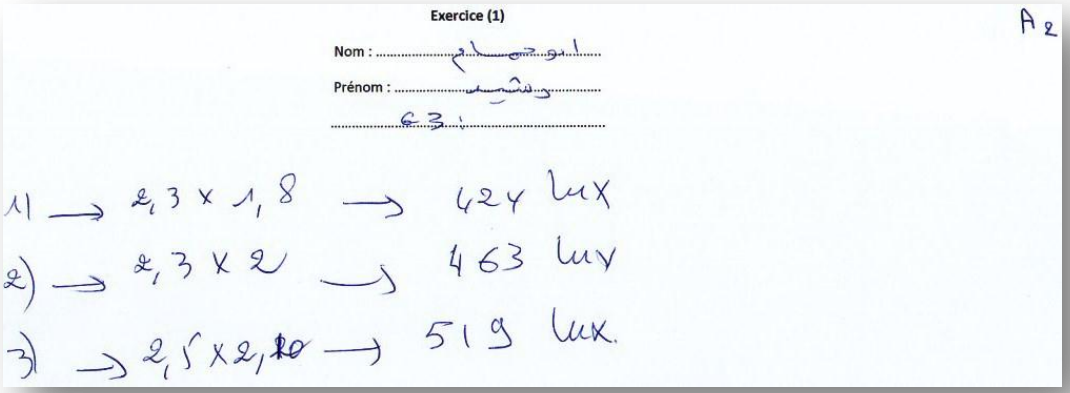
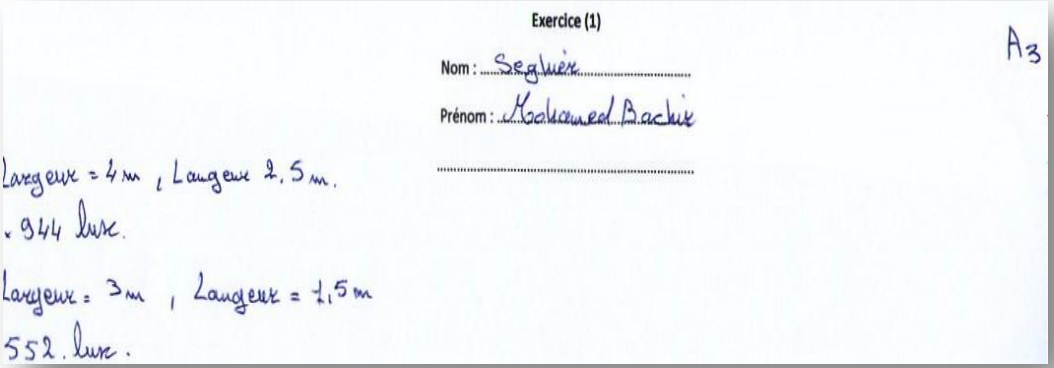
Annexe C

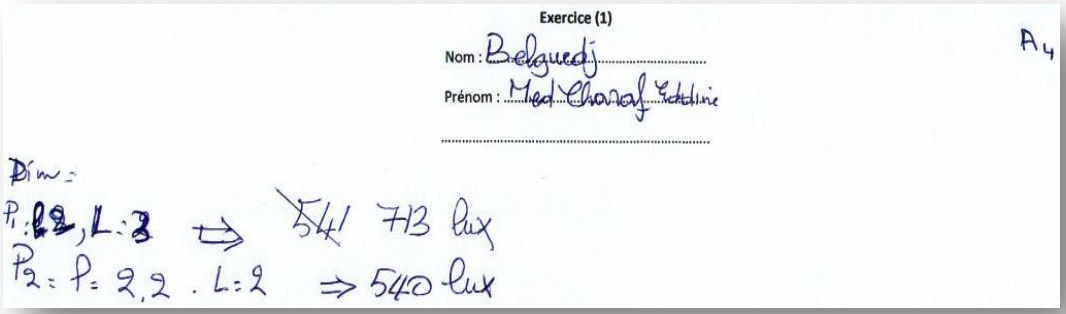
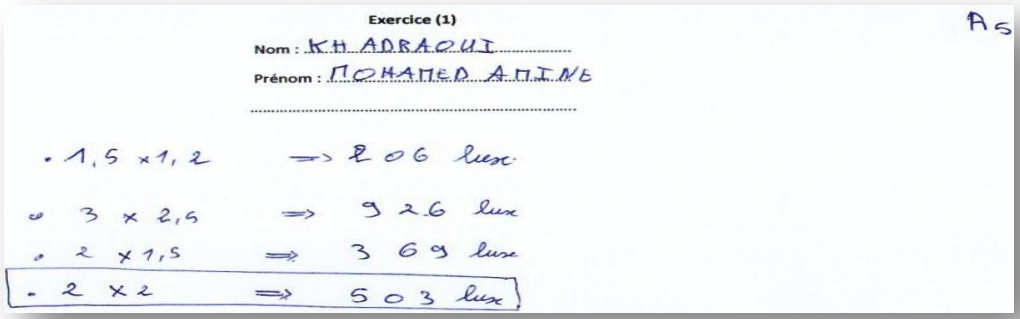
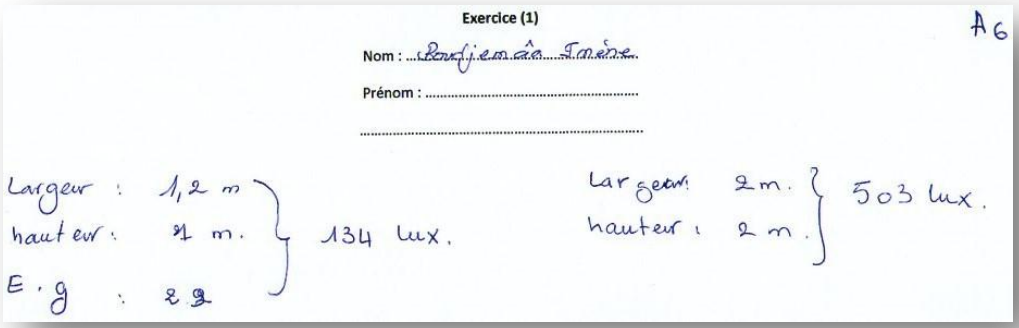
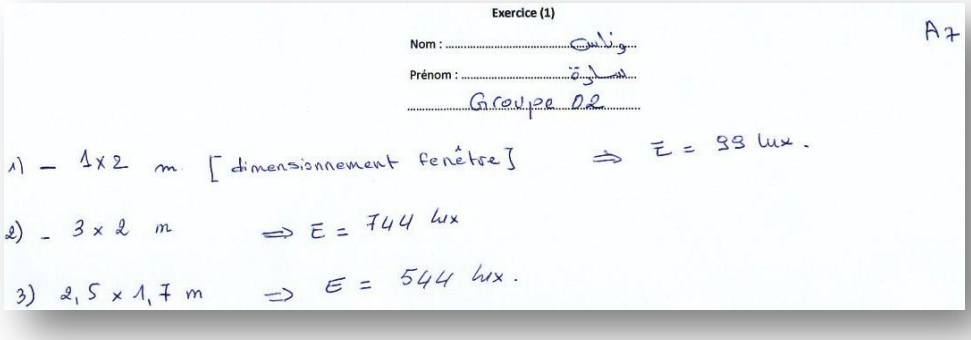
Liste des étudiants choisis pour l'expérience répartis en deux groupes

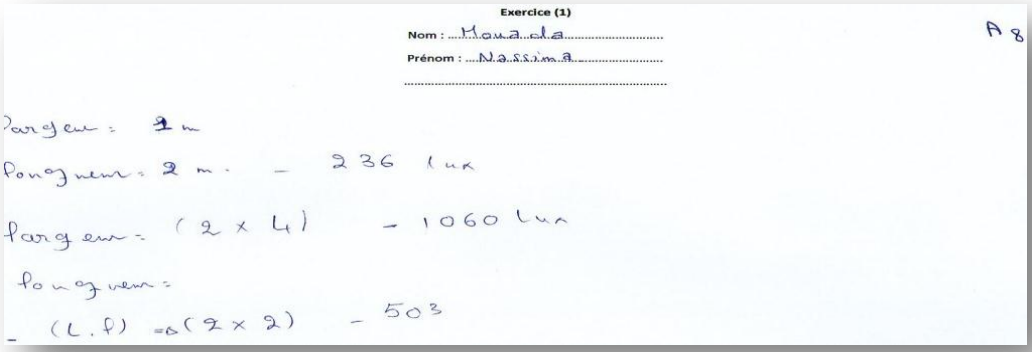
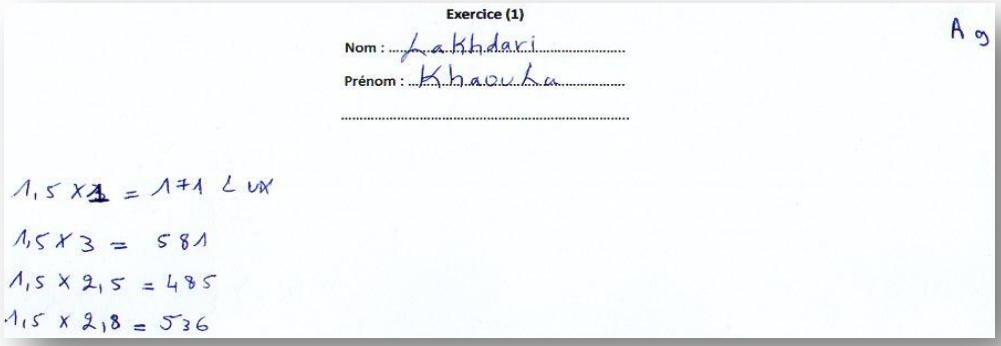
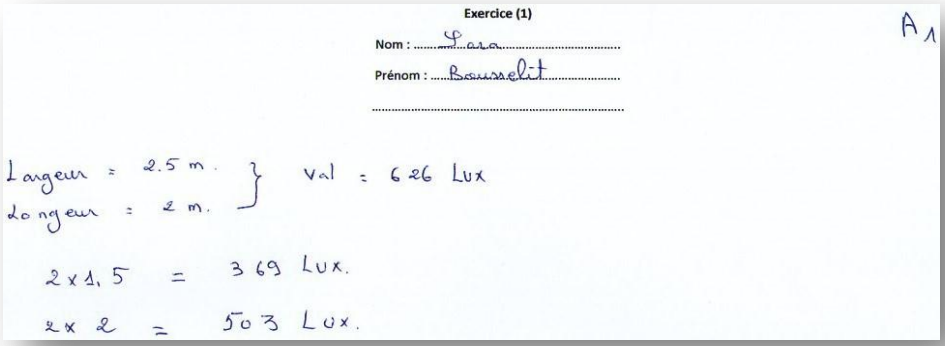
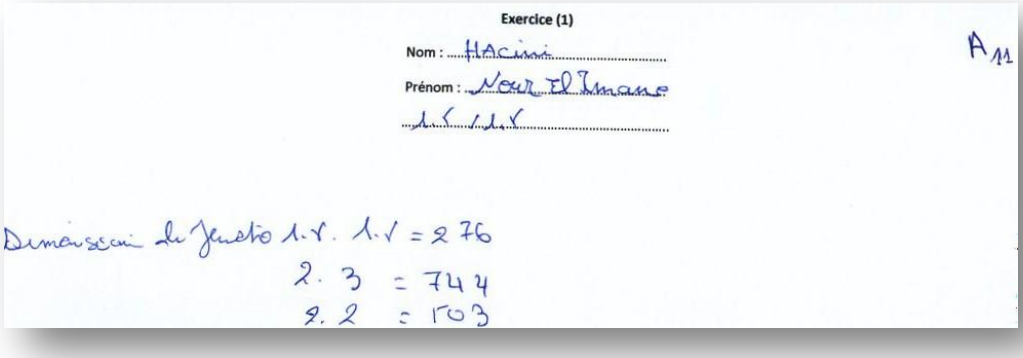
Groupe A	Groupe B
A1 → Boumaaraf Amina	B1 → Djedidi Imen
A2 → Abouhamam Rachid	B2 → Tatai Ghalia
A3 → Seghier Mouhamed Bachir	B3 → Djabourabi Zineb
A4 → Belghedj Mohamed Ghazal Edine	B4 → Djedidi Khaola
A5 → Khadraoui Mohamed Amine	B5 → Mansour Zohra
A6 → Boudjemaa Imène	B6 → Haga Hana
A7 → Ouanas Sara	B7 → Abdellaoui Imad Eddine
A8 → Mouada Nassima	B8 → Rouag Imane
A9 → Lakhdari Khaoula	B9 → Tahraoui Ali
A10 → Bousselit Sara	B10 → Bensalah Atef
A11 → Hacini Nour El Imane	B11 → Tamene Nadia
A12 → Chaouche Souhaib	B12 → Lahmar Imane
A13 → Lakhdari Sara	B13 → Hitama Hafida
A14 → Mahamdi Asma	B14 → Haddoud Kamel
A15 → Saada Kenza	B15 → Houideg Hocine
A16 → Hadji Majda Abir	B16 → Amouri Nossaïr
A17 → Djoudi Asma	B17 → Brahimi Mohamed
A18 → Ruiha Manel	B18 → Abbas Abderrazak
A19 → Zine Ilyas	B19 → Tafsast Khaled

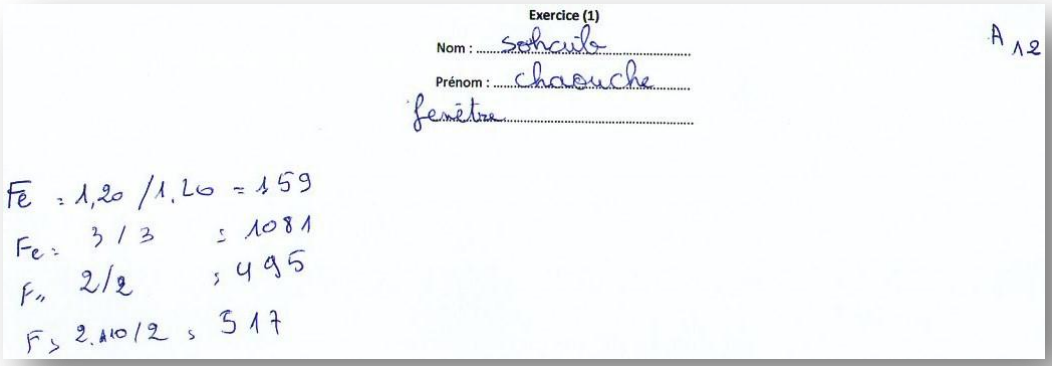
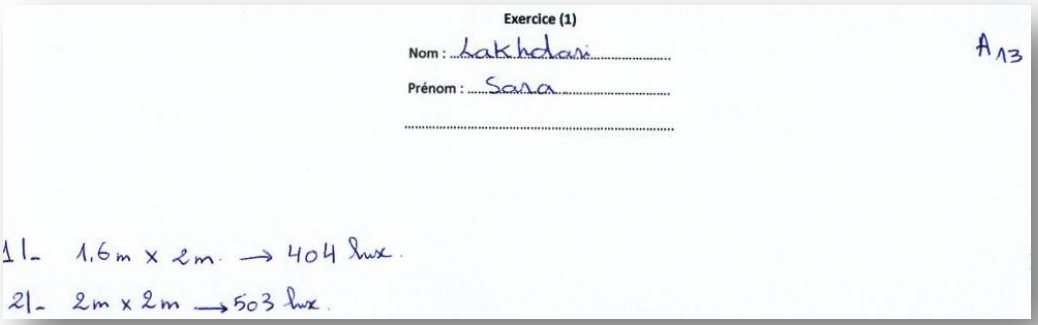
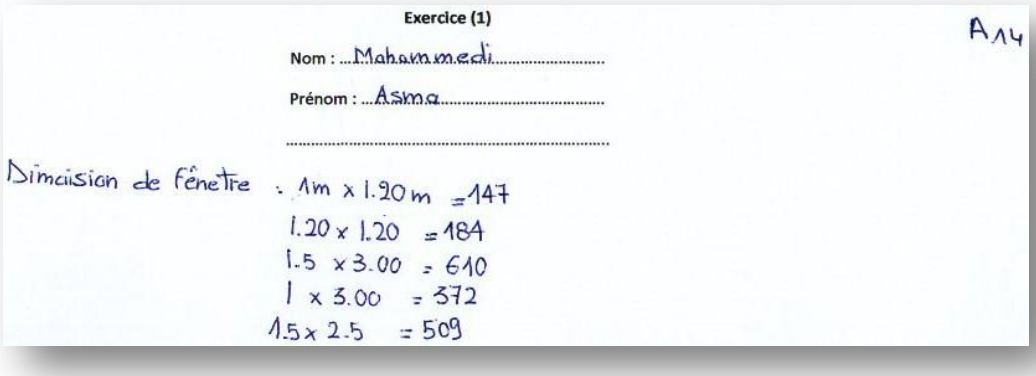
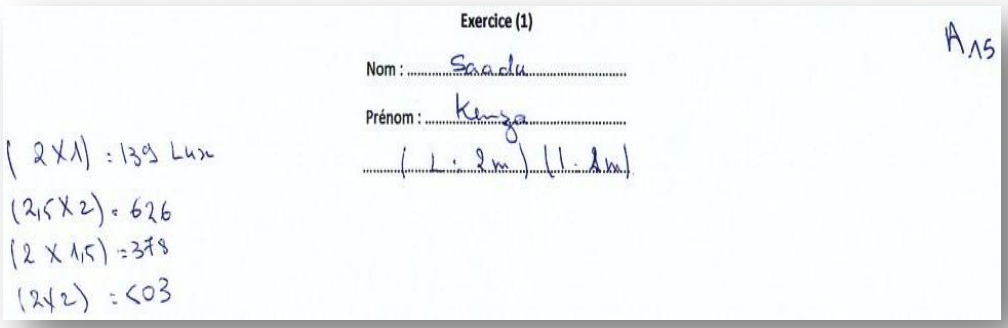
Figure (A33) : les deux groupes choisis pour l'exercice. **Source :** Auteur

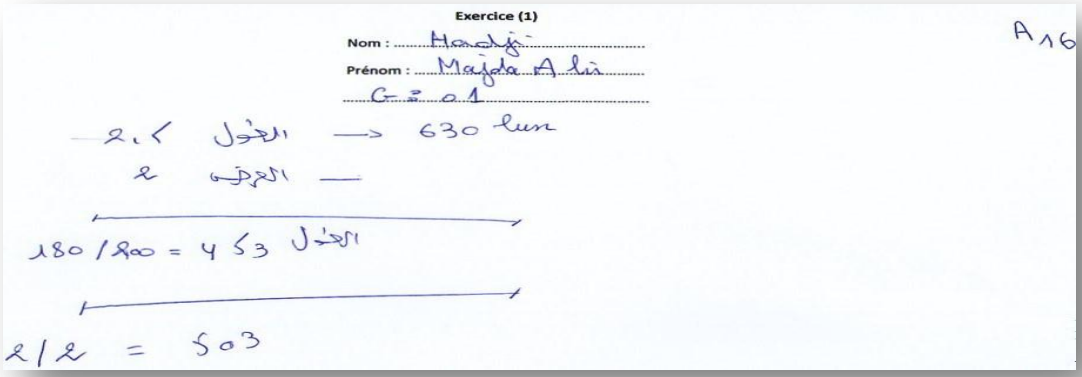
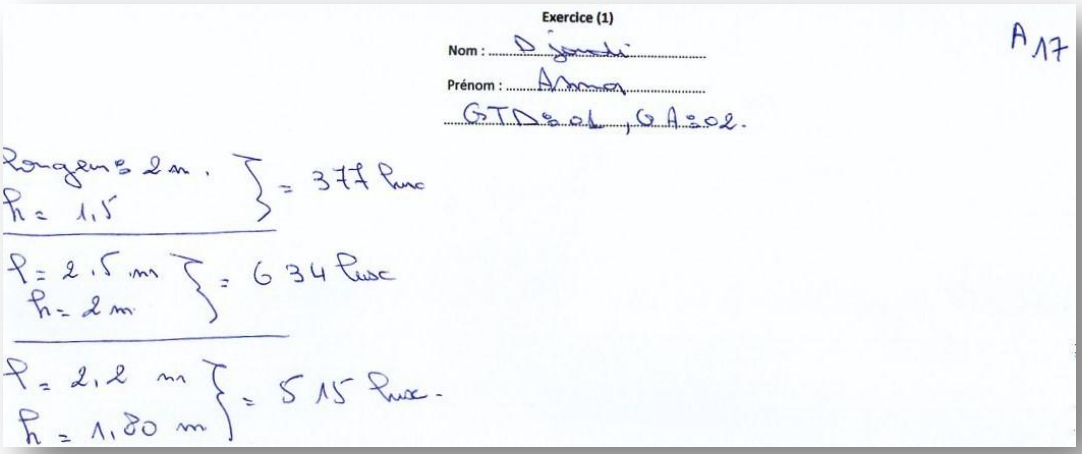
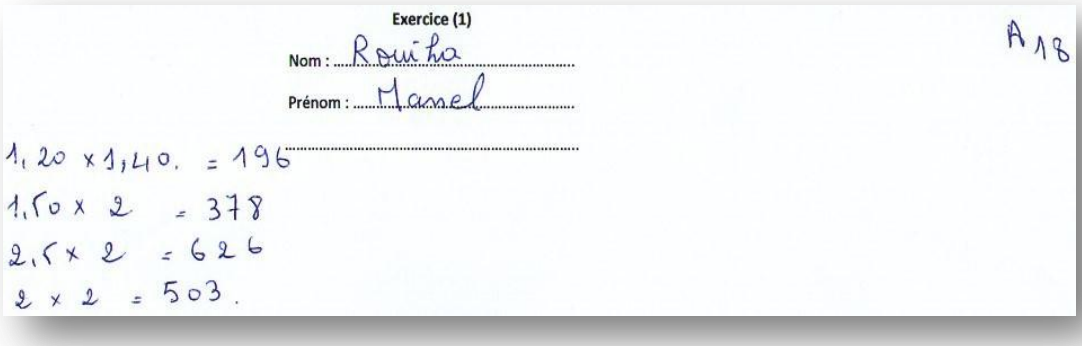
Résultats de l'expérience (Groupe A):

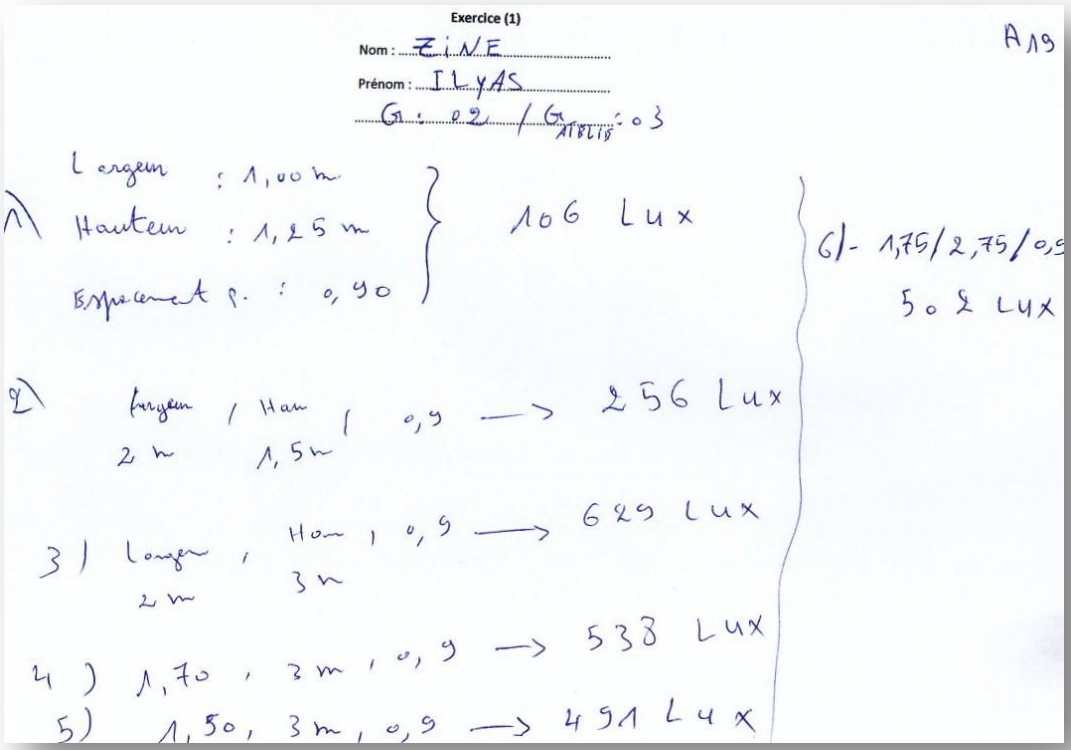
Sujet	Résultat
A1	
A2	
A3	

A4	
A5	
A6	
A7	

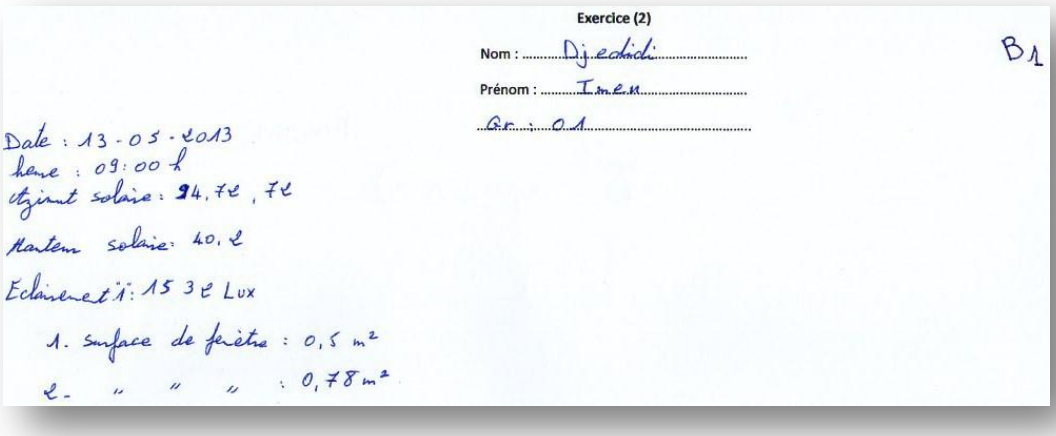
A8	
A9	
A10	
A11	

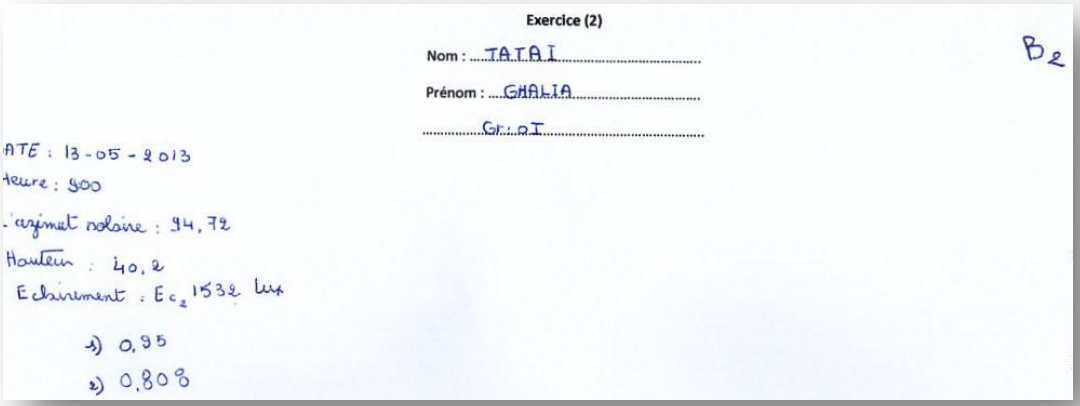
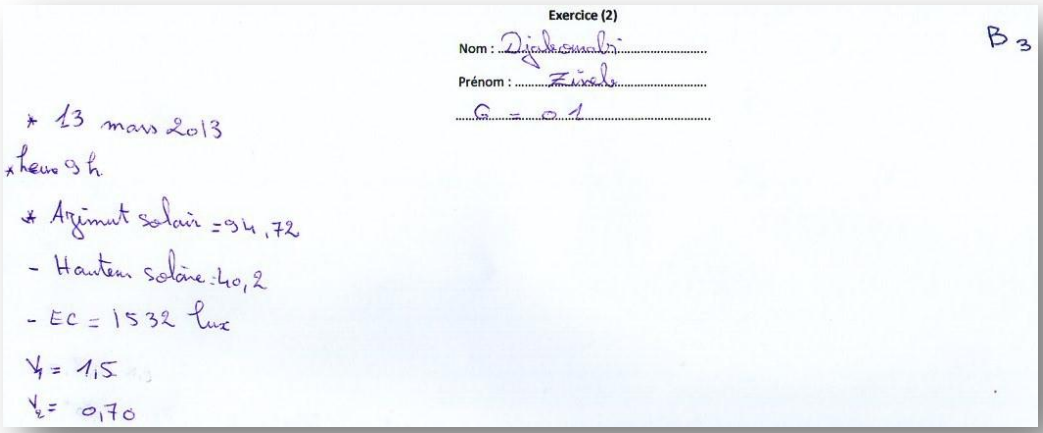
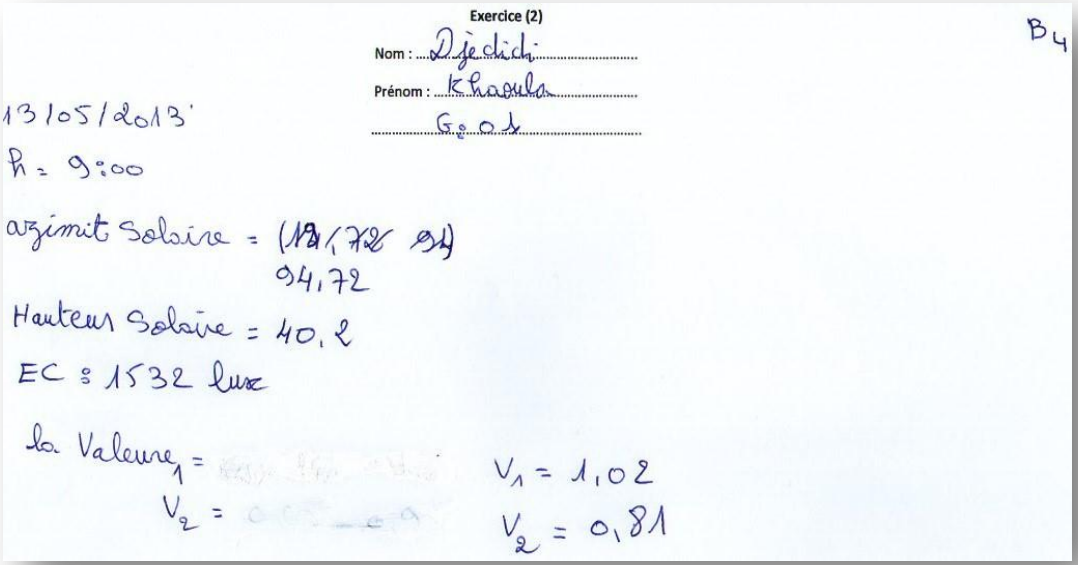
A12	
A13	
A14	
A15	

A16	 Exercice (1) Nom : Hadji Prénom : Majda Alia G : 01 A16 2,5 الطول → 630 lux 2 العرض — 180/200 = 453 الطول 2/2 = 503
A17	 Exercice (1) Nom : Djoudi Prénom : Ama GTD : 01 , GA : 02. A17 Longeur : 2 m. h = 1,5 } = 377 lux l = 2,5 m h = 2 m } = 634 lux l = 2,2 m h = 1,80 m } = 515 lux.
A18	 Exercice (1) Nom : Rouiha Prénom : Manel A18 1,20 x 1,40. = 196 1,50 x 2 = 378 2,5 x 2 = 626 2 x 2 = 503.

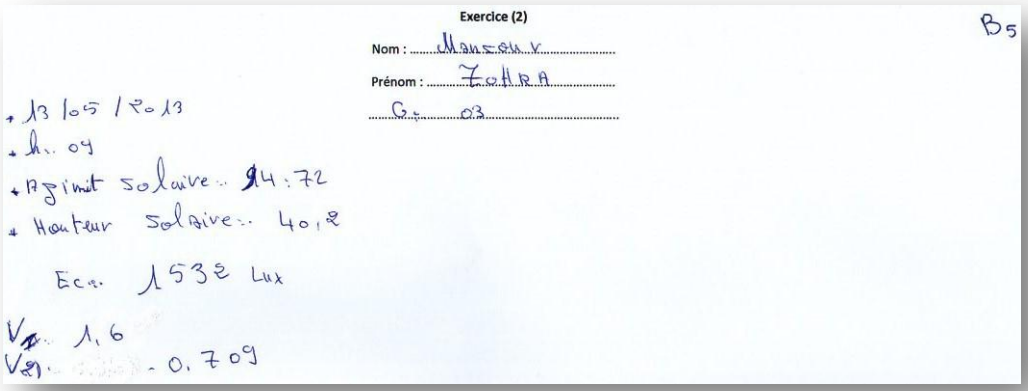
A19	

Résultats de l'expérience (Groupe B):

Sujet	**Résultat**
B1	

B2	 Exercice (2) Nom : TATAI Prénom : GHALIA Gr: 01 B2 ATE : 13-05-2013 Heure : 900 L'azimut solaire : 94,72 Hauteur : 40,2 Eclairement : Ec_2 1532 lux 1) 0,95 2) 0,808
B3	 Exercice (2) Nom : Djakoumbi Prénom : Zineb G = 01 B3 * 13 mars 2013 * heure 9 h * Azimut solair = 94,72 - Hauteur solaire : 40,2 - EC = 1532 lux V_1 = 1,5 V_2 = 0,70
B4	 Exercice (2) Nom : Djedidi Prénom : Khaoula G: 01 B4 13/05/2013 h = 9:00 azimit Solaire = (~~13,72 94~~) 94,72 Hauteur Solaire = 40,2 EC : 1532 lux la Valeure$_1$ = V_1 = 1,02 V_2 = V_2 = 0,81

B5



Exercice (2)

Nom : Mansouri

Prénom : Zahra

G : 03

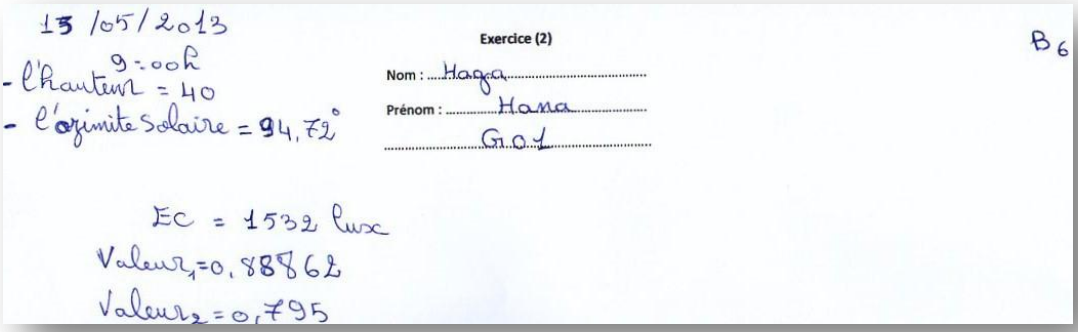
B5

+ 13/05/2013
+ h : 09
+ Azimut solaire : 94,72
+ Hauteur solaire : 40,2

Ec : 1532 Lux

V_1 : 1,6
V_2 : 0,709

B6



13/05/2013
- l'heure 9:00h
- l'azimute Solaire = 94,72°

Exercice (2)

Nom : Hagga

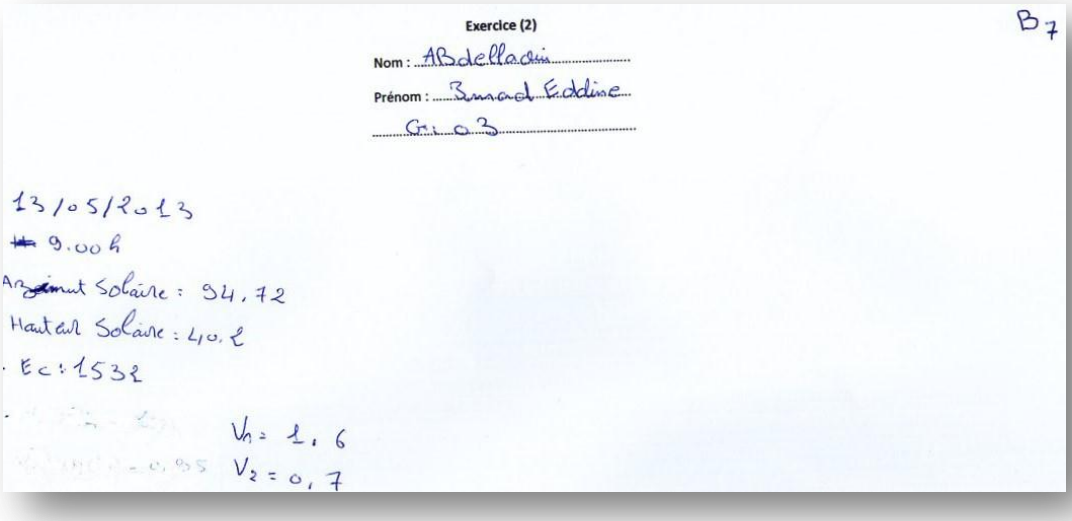
Prénom : Hana

G.01

B6

EC = 1532 lux
$Valeur_1$ = 0,8862
$Valeur_2$ = 0,795

B7



Exercice (2)

Nom : ABdellaoui

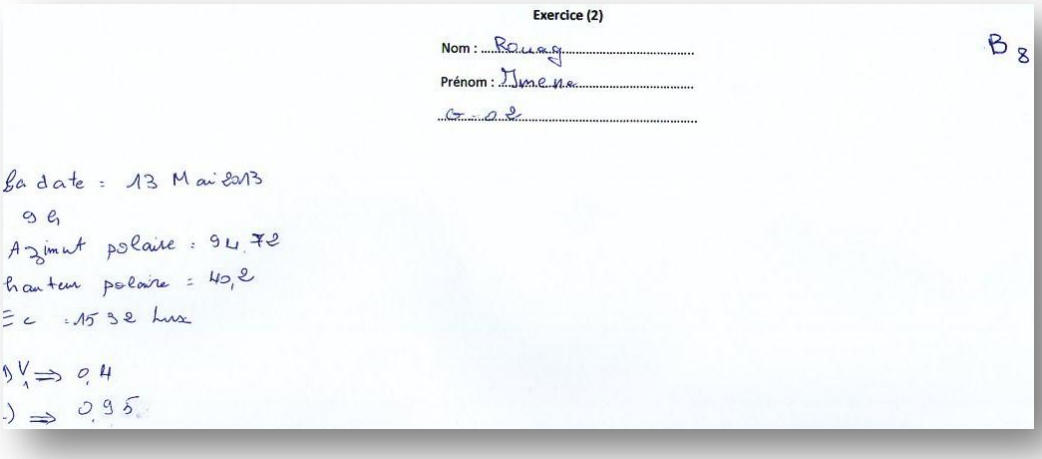
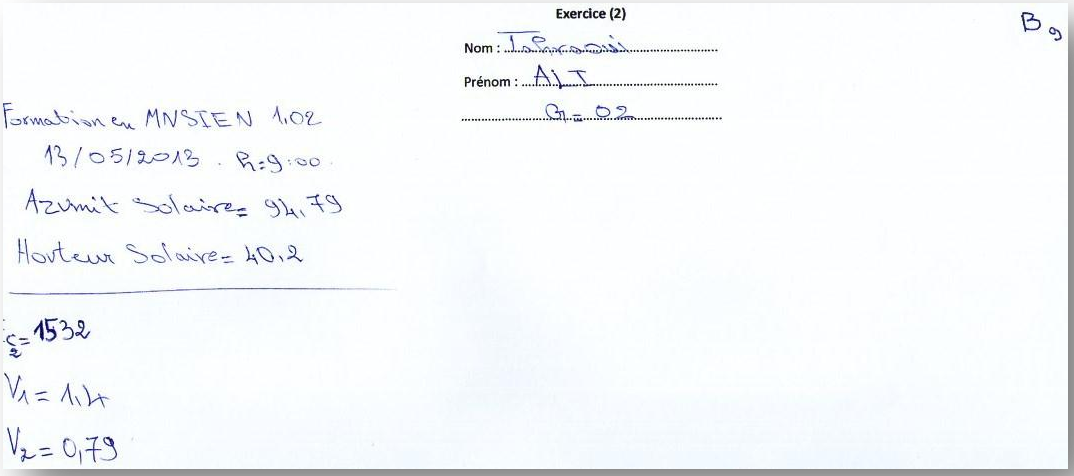
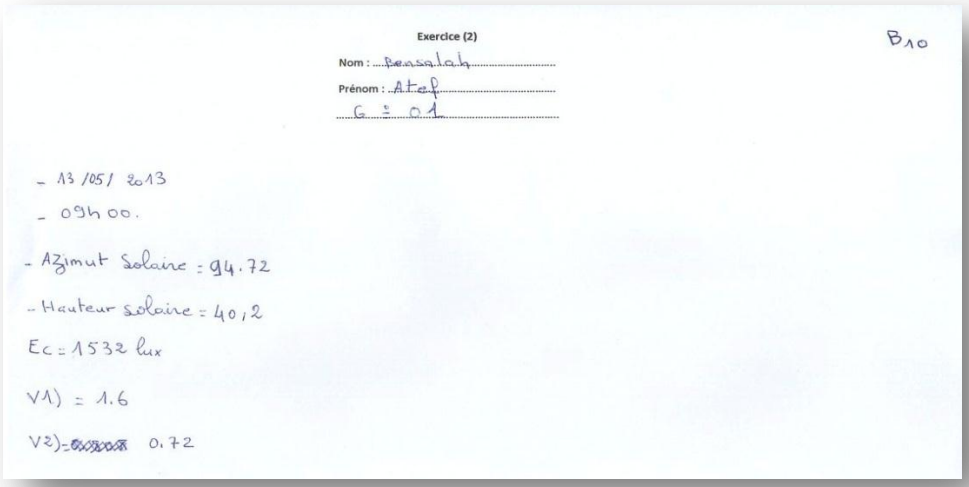
Prénom : Imad Eddine

G : 03

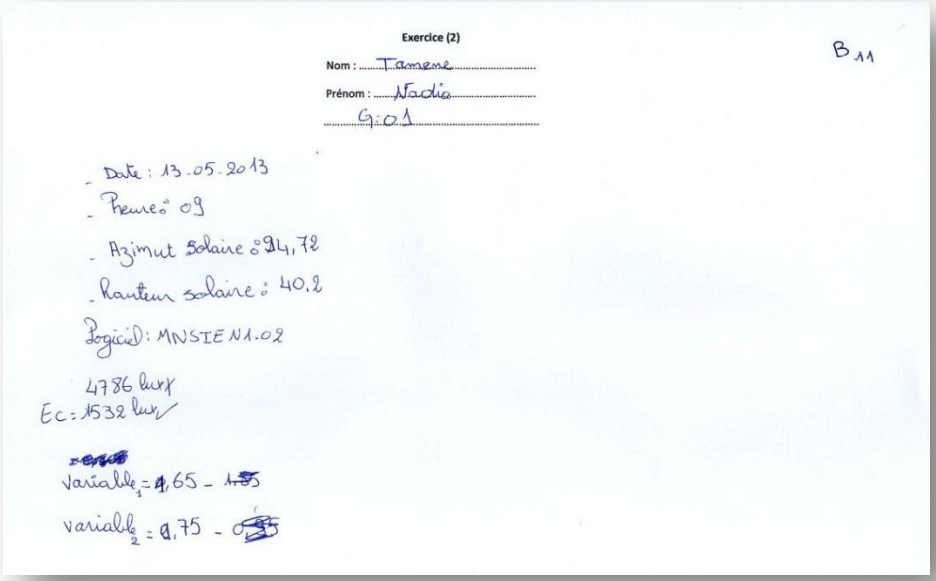
B7

13/05/2013
9.00h
Azimut Solaire : 94,72
Hauteur Solaire : 40,2
Ec : 1532

V_1 = 1,6
V_2 = 0,7

B8	 Exercice (2) Nom : Rouag Prénom : Imene G - 02 B 8 La date : 13 Mai 2013 9 h Azimut polaire : 94.72 hauteur polaire : 40,2 Ec : 1532 lux 1) $V_1 \Rightarrow$ 0,4 2) $\Rightarrow$ 0,95
B9	 Exercice (2) Nom : Tahrassi Prénom : ALI G = 02 B 9 Formation en MNSIEN 1,02 13/05/2013 . h:9:00 Azimut Solaire = 94,79 Hauteur Solaire = 40,2 E_c = 1532 V_1 = 1,4 V_2 = 0,79
B10	 Exercice (2) Nom : Bensalah Prénom : Atef G : 01 B10 - 13/05/2013 - 09h00. - Azimut Solaire : 94.72 - Hauteur solaire = 40,2 Ec = 1532 lux V1) = 1.6 V2) = 0.72

B11



Exercice (2)

Nom : Tamene

Prénom : Nadia

G:01

B 11

- Date : 13.05.2013
- Pause : 09
- Azimut Solaire : 94,72
- Hauteur solaire : 40,2

Logiciel : MNSIEN1.02

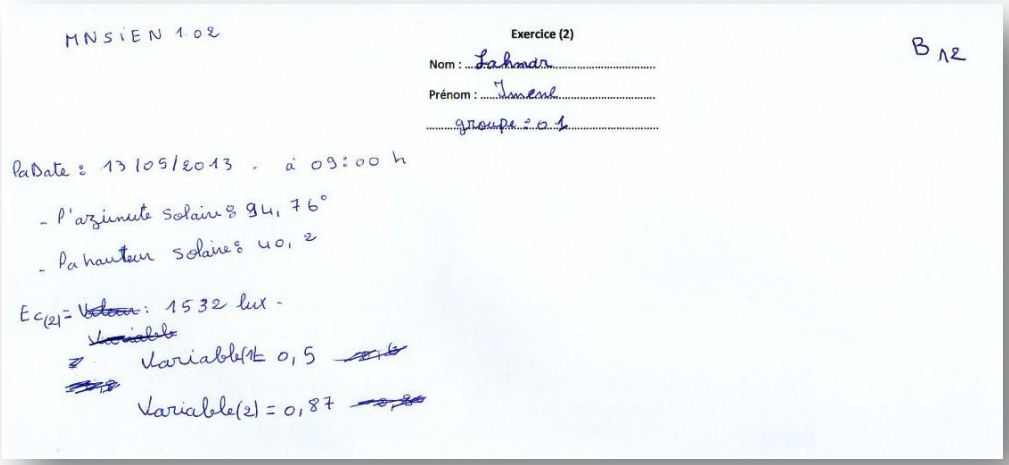
4786 lux

Ec = 1532 lux

Variable$_1$ = 0,65 -

Variable$_2$ = 0,75 -

B12



MNSIEN 1.02

Exercice (2)

Nom : Lahmar

Prénom : Imene

groupe : 01

B 12

Date : 13/05/2013 à 09:00 h

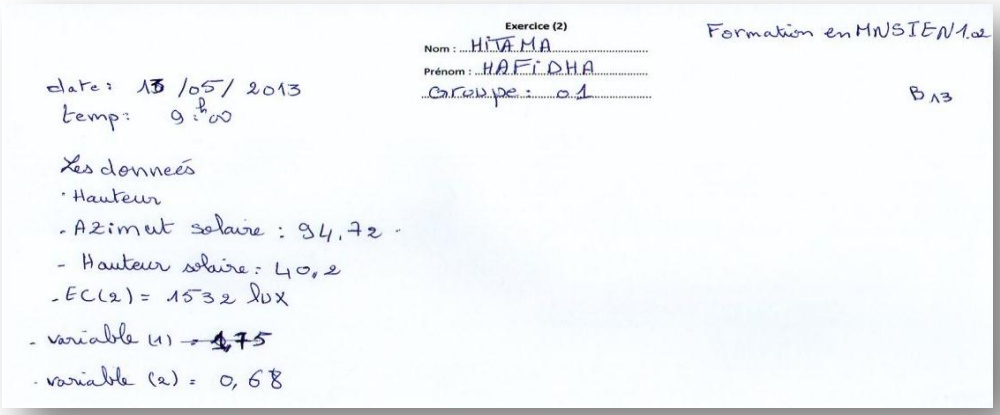
- l'azimute solaire : 94,76°
- la hauteur solaire : 40,2

Ec(2) = : 1532 lux

Variable(1) = 0,5

Variable(2) = 0,87

B13



Exercice (2)

Nom : HITAMA

Prénom : HAFIDHA

Groupe : 01

Formation en MNSIEN1.02

B 13

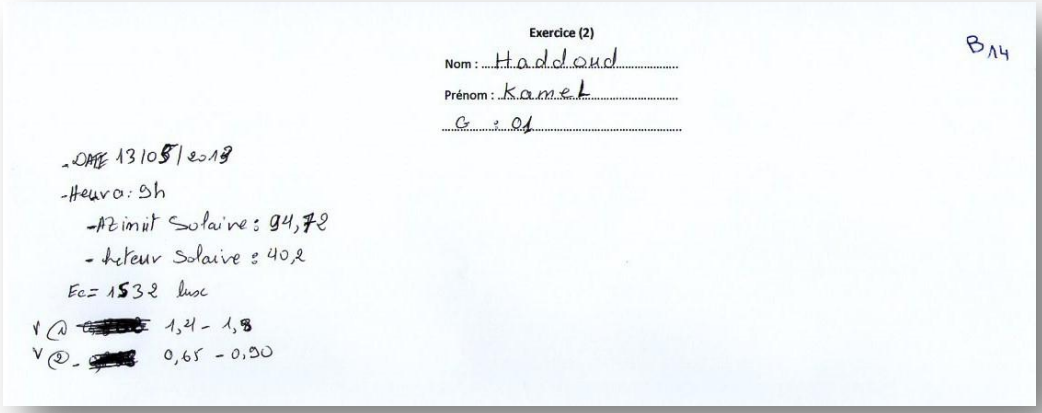
date : 13/05/2013

temp : 9 h 00

Les données

- Hauteur
- Aziment solaire : 94,72
- Hauteur solaire : 40,2
- EC(2) = 1532 lux
- variable (1) = 0,75
- variable (2) = 0,68

B14



Exercice (2)

Nom : Haddoud

Prénom : Kamel

G : 01

B14

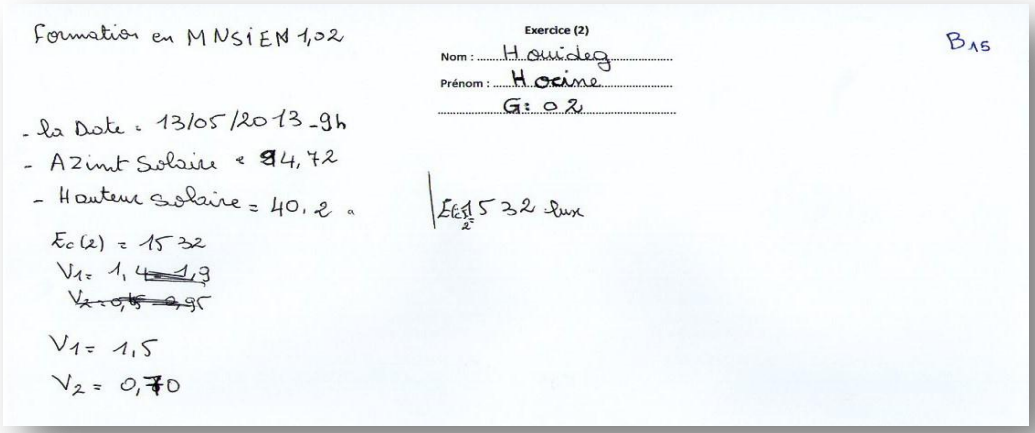
- Date 13/05/2013
- Heure : 9h
- Azimut Solaire : 94,72
- Hauteur Solaire : 40,2

Ec = 1532 lux

V1 [redacted] 1,4 - 1,9

V2 - [redacted] 0,65 - 0,90

B15



Formation en MNSIEN 1,02

Exercice (2)

Nom : Houideg

Prénom : Hocine

G: 02

B15

- la Date : 13/05/2013 - 9h
- Azimut Solaire : 94,72
- Hauteur Solaire = 40,2 °

$E_{c(2)}$ = 1532 lux

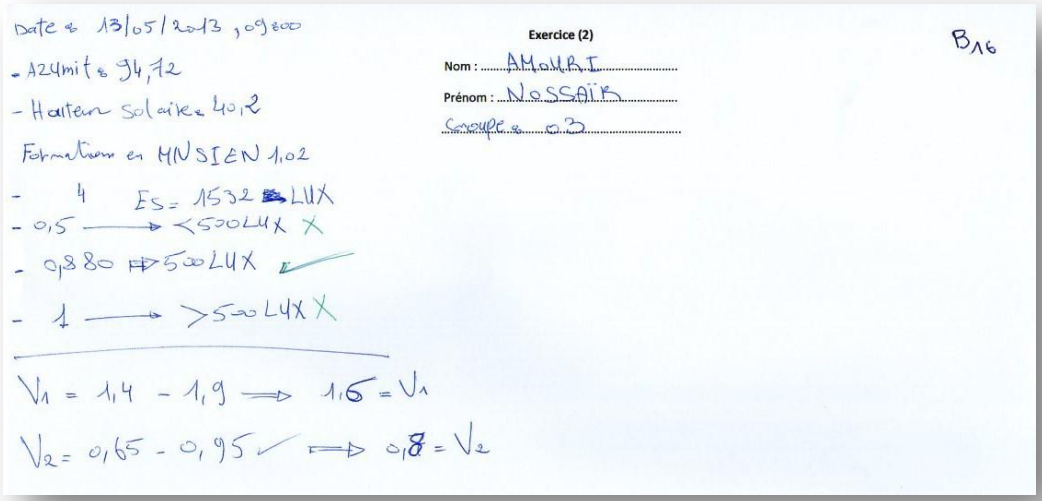
V_1 = 1,4 ~~1,9~~

~~V_2 = 0,65 - 0,95~~

V_1 = 1,5

V_2 = 0,70

B16



Date : 13/05/2013 , 09800

- Azimut : 94,72
- Hauteur Solaire : 40,2

Formation en MNSIEN 1,02

- 4 Es = 1532 LUX
- 0,5 ⟶ < 500 LUX X
- 0,80 ⇨ 500 LUX ✓
- 1 ⟶ > 500 LUX X

V_1 = 1,4 - 1,9 ⟹ 1,6 = V_1

V_2 = 0,65 - 0,95 ✓ ⟹ 0,8 = V_2

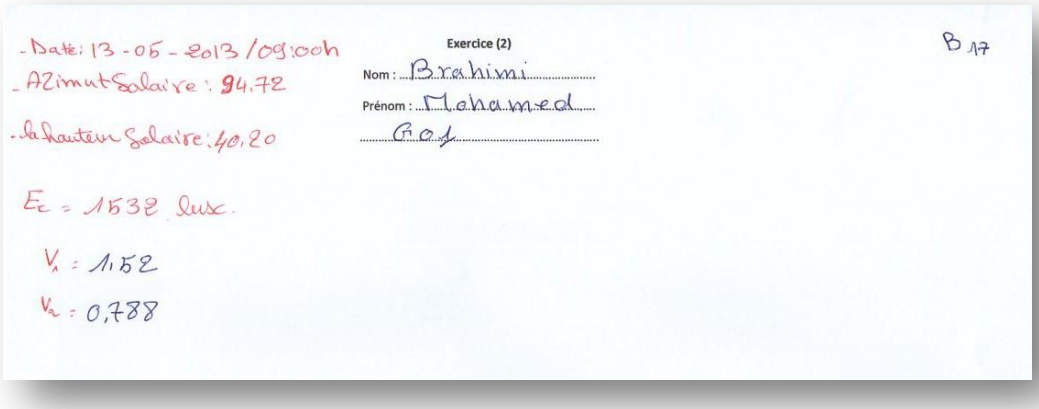
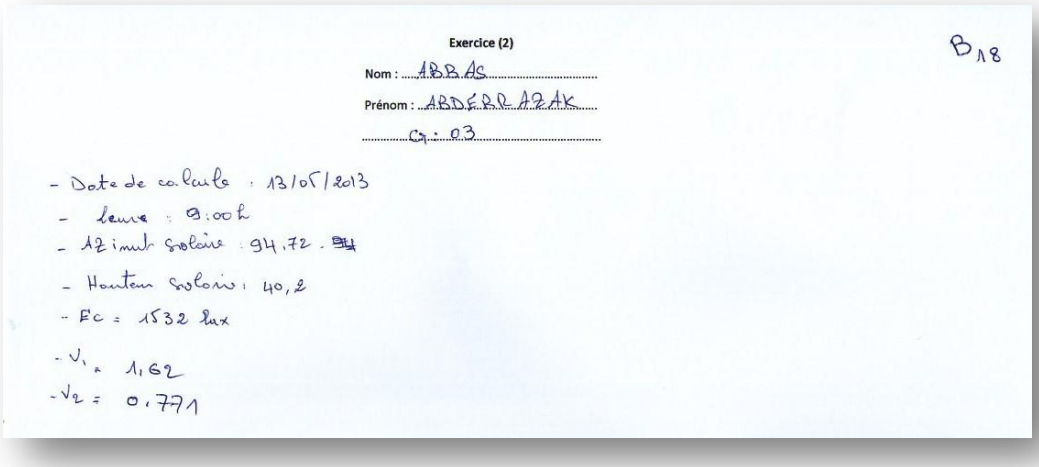
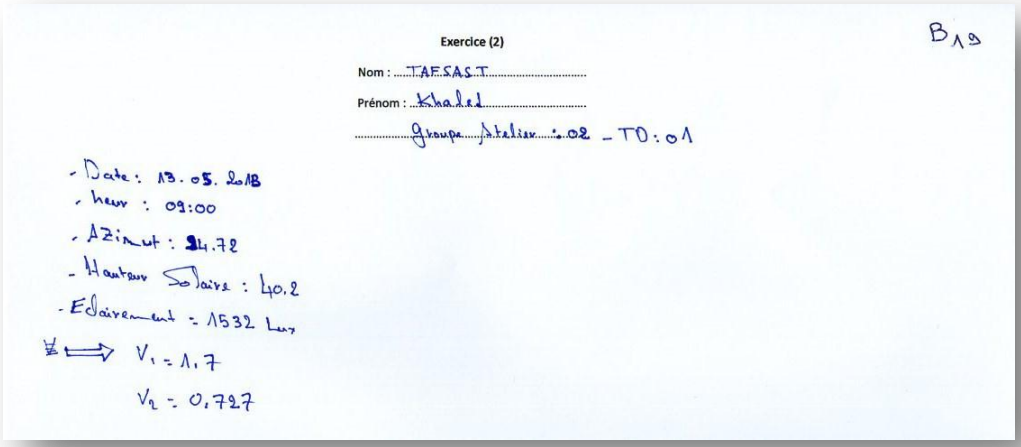
Exercice (2)

Nom : AMMARI

Prénom : Nassim

Groupe : 03

B16

B17	 B 17 Exercice (2) Nom : Brahimi Prénom : Mohamed Gr1 - Date: 13-05-2013 / 09:00h - Azimut Solaire : 94.72 - la hauteur Solaire: 40,20 Ec = 1532 lux. V1 = 1,152 V2 = 0,788
B18	 B 18 Exercice (2) Nom : IBBAS Prénom : ABDERRAZAK Gr: 03 - Date de calcule : 13/05/2013 - heure : 9:00 h - Azimut solaire : 94,72 - Hauteur solaire : 40,2 - Ec = 1532 lux - V1 = 1,62 - V2 = 0,771
B19	 B 19 Exercice (2) Nom : TAFSAST Prénom : Khaled Groupe Atelier : 02 - TD : 01 - Date : 13.05.2018 - heur : 09:00 - Azimut : 94.72 - Hauteur Solaire : 40.2 - Eclairement : 1532 Lux V1 = 1,7 V2 = 0,727

LISTE DES FIGURES

Figure	Page	Désignation	Source
Fig (1)	15	représentation des classes d'éléments constituant le projet architectural.	Siret, 1997
Fig (2)	16	représentation de la classe d'effet dans le projet architectural.	Siret, 1997
Fig (3)	16	représentation de la dynamique du processus de conception architectural.	Siret, 1997
Fig (4)	19	esquisse de Norman Foster pour le dôme du Reichstag.	Phillips (2004)
Fig (5)	19	intérieur du dôme du Reichstag.	Phillips (2004)
Fig (6)	19	Le dôme du Reichstag pendant la nuit	Phillips (2004)
Fig (7)	20	Coupe-esquisse montrant le principe de conception de la maison "De Syllas House".	Phillips (2004)
Fig (8)	20	façade de la maison "De Syllas House".	Phillips (2004)
Fig (9)	20	le séjour de la maison "De Syllas House".	Phillips (2004)
Fig (10)	21	Coupe-esquisse montrant les ambitions des concepteurs pour le "Orchard Learning and Resource Centre"	Phillips (2004)
Fig (11)	21	Façade principale du "Orchard Learning and Resource Centre"	Phillips (2004)
Fig (12)	21	l'espace Bibliothèque dans le "Orchard Learning and Resource Centre"	Phillips (2004)
Fig (13)	22	Maquette De l'"American Community School, Sports Centre" montrant les ambitions des architectes.	www.studioe.co.uk

Fig (14)	22	l'intérieur de l'espace piscine dans l'"American Community School, Sports Centre"	www.studioe.co.uk
Fig (15)	22	l'intérieur de la salle de sport dans l'"American Community School, Sports Centre"	Phillips (2004)
Fig (16)	23	Coupe-esquisse montrant l'insertion du musée " Weald and Downland" dans son environnement.	Phillips (2004)
Fig (17)	23	l'extérieur du musée " Weald and Downland".	wealddown.co.uk
Fig (18)	23	l'espace principal du musée " Weald and Downland".	westdeanvisualarts.com
Fig (19)	32	Les valeurs recommandées pour le contraste.	MUDRI (2012)
Fig (20)	45	Description du modèle choisi pour la simulation. (Dimension de local et emplacement de l'ouverture)	Auteur
Fig (21)	47	Schéma représentant les étapes de travail de simulation avec les logiciels DIALux et Ecotect.	Auteur
Fig (22)	48	Schéma représentant les étapes de travail avec les logiciels de simulation directe de l'éclairage naturel.	Auteur
Fig (23)	49	Répartition des tâches dans une modélisation déclarative.	Colin (1998)
Fig (24)	53	Schémas du processus direct et inverse de simulation de l'ensoleillement.	Houpert (2003)
Fig (25)	54	Schéma représentant la simulation directe et inverse au niveau bidimensionnel.	Houpert (2003)
Fig (26)	58	Exemple d'une interface textuelle d'un logiciel.	www.debian.org
Fig (27)	59	Exemple d'une interface graphique d'un logiciel.	Grin (2011).

Fig (28)	66	Géométrie et dimensions du modèle choisi pour le calcul (échelle1/100).	Auteur
Fig (29)	67	hauteur du plan de travail et meilleur côté pour la prévenance de la lumière.	Neufert (1983)
Fig (30)	68	Axonométrie représentant l'emplacement des trois pointspar rapport à l'espace (échelle 1/200).	Auteur
Fig (31)	68	Schéma synthétisant le déroulement du calcul (1).	Auteur
Fig (32)	69	Description des données de calcul pour l'étape (1).	Auteur
Fig (33)	69	Description des angles utilisés pour le calcul (1).	Kittler (2002)
Fig (34)	72	Schéma synthétisant le déroulement du calcul (2).	Auteur
Fig (35)	73	Description des données nécessaires pour le calcul (2).	Auteur
Fig (36)	73	Description des angles utilisés pour le calcul (2).	Tourre (2007)
Fig (37)	77	Axonométrie représentant les dimensions et l'emplacement de (F1)	Auteur
Fig (38)	77	Axonométrie représentant les dimensions et l'emplacement de (F2)	Auteur
Fig (39)	78	Axonométrie représentant les dimensions et l'emplacement de (F3)	Auteur
Fig (40)	78	Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P1).	Output du logiciel DIALux 4.11
Fig (41)	79	Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P2).	Output du logiciel DIALux 4.11

Fig (42)	79	Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P3).	Output du logiciel DIALux 4.11
Fig (43)	80	Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P1).	Output du logiciel Ecotect Analysis 2011
Fig (44)	80	Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P2).	Output du logiciel Ecotect Analysis 2011
Fig (45)	81	Résultat du calcul du niveau d'éclairement au point (P3).	Output du logiciel Ecotect Analysis 2011
Fig (46)	81	Vue en plan représentant une récapitulation des résultats de la validation.	Auteur
Fig (47)	84	Représentation de la page de calcul comme interface utilisateur.	Output du logiciel MATLAB2009b
Fig (48)	85	Palette incluant les résultats de calcul (output du modèle).	Output du logiciel MATLAB2009b
Fig (49)	90	Choix de l'échantillon pour l'exercice.	Auteur
Fig (50)	90	Codage des membres des deux groupes choisis pour l'exercice.	Auteur
Fig (51)	94	Réajustement des résultats de l'expérience.	Auteur
Fig (52)	101	Graphes représentant l'évolution des résultats de l'évaluation, Paramètre «Dimensions» pour le groupe A.	Auteur
Fig (53)	102	Graphe représentant l'évolution des résultats de l'évaluation, Paramètre «Dimensions» pour le groupe B.	Auteur
Fig (54)	103	Graphes représentant l'évolution des résultats de l'évaluation, Paramètre « Surface » pour le groupe A.	Auteur
Fig (55)	104	Graphes représentant l'évolution des résultats de l'évaluation, Paramètre « Surface » pour le groupe B.	Auteur

Fig (56)	105	Courbe de rapprochement entre les résultats de la première tentative des groupes A et B.	Auteur
Fig (57)	106	Courbe de rapprochement entre les résultats de la deuxième tentative des groupes A et B.	Auteur
Fig (58)	106	Courbe de rapprochement entre les résultats de la troisième tentative des groupes A et B.	Auteur
Fig (59)	107	Courbe de rapprochement entre les résultats de la quatrième tentative des groupes A et B.	Auteur
Fig (60)	107	Courbe de rapprochement entre les résultats de la première tentative des groupes A et B.	Auteur
Fig (61)	108	Courbe de rapprochement entre les résultats de la deuxième tentative des groupes A et B.	Auteur
Fig (62)	108	Courbe de rapprochement entre les résultats de la troisième tentative des groupes A et B.	Auteur
Fig (63)	109	Courbe de rapprochement entre les résultats de la quatrième tentative des groupes A et B.	Auteur

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page	Désignation	Source
Tab (1)	14	représentant une récapitulation des contributions.	Auteur
Tab (2)	44	représentant les méthodes de calcul utilisées pour chaque logiciel.	Auteur
Tab (3)	70	Valeurs des différents angles et distances nécessaires pour le calcul (1).	Auteur
Tab (4)	70	Valeurs des différents coefficients nécessaires pour le calcul (1).	Auteur
Tab (5)	74	Valeurs des différents coefficients nécessaires pour le calcul.	Auteur
Tab (6)	74	Valeurs des différentes grandeurs nécessaires pour les éléments d'ouverture.	Auteur
Tab (7)	74	Valeurs des différentes surfaces nécessaires pour les éléments d'ouverture.	Auteur
Tab (8)	74	Valeurs des différents côtés constituants les éléments d'ouverture.	Auteur
Tab (9)	83	Synthèse des valeurs des TV et de CM pour tous les points de calcul.	Auteur
Tab (10)	92	Tableau représentant les résultats de l'expérience pour le groupe A.	Auteur
Tab (11)	94	Tableau représentant nombre d'étudiants pour chaque tentative.	Auteur
Tab (12)	95	Tableau représentant les résultats de l'expérience pour le groupe B.	Auteur

Tab (13)	95	Tableau représentant le nombre d'étudiants pour la seule tentative.	Auteur
Tab (14)	97	Tableau représentant une évaluation des résultats du groupe A, paramètre « Dimension »	Auteur
Tab (15)	98	Tableau représentant une évaluation des résultats du groupe A, paramètre « surface »	Auteur
Tab (16)	99	Tableau représentant une évaluation des résultats du groupe B, paramètre « Dimension ».	Auteur
Tab (17)	100	Tableau représentant une évaluation des résultats du groupe B, paramètre « surface »	Auteur
Tab (18)	109	Tableau représentant une le rapprochement entre les résultats des deux Groupes A et B.	Auteur
Tab (19)	110	Tableau représentant une comparaison entre DIALux4.11.02 et MNSIEN	Auteur

BIBLIOGRAPHIE

Liste des livres :

[Adolphe, 1998] **Luc Adolphe** (1998), Les Cahiers De La Recherche Architecturale N°42/43 3eme Trimestre 1998 ..., Editions Parenthèses.

[Alexander, 1964] **Alexander, Christopher** (1964), Notes on the Synthesis of Form, Cambridge, MA: Harvard University Press.

[Archer, 1965] **L. B. Archer** (1965), Systematic Method for Designers, the Design Council: London.

[Bachmann, 2000] **Felix Bachmann, Len Bass, Gary Chastek, Patrick Donohoe, Fabio Peruzzi** (2000), The Architecture Based Design Method, Carnegie Mellon University.

[Basdevant, 2008] **Jean-Louis Basdevant & Jean Dalibard** (Mars 2008), Mécanique quantique, édition de l'école polytechnique.

[Bibasse, 2009] **Juliette Bibasse** (2009), Une perception de l'espace urbain, ESAD Amiens, DNSEP design graphique.

[Broadbent, 1969] **Geoffrey Broadbent** & **Anthony Ward** (1969), Design Methods in Architecture, Lund Humphries, London.

[Boudon, 1971] **Philippe Boudon** (1971), Sur l'espace architectural, Essai d'épistémologie, Paris, Dunod.

[Boudon, 1972] **Philippe Boudon** (1972), La ville de Richelieu, étude de la notion d'échelle en architecture, Paris : LAREA.

[Boudon, 2002] **Philippe Boudon** (2002), De l'architecture à l'épistémologie ; la question de l'échelle, édition Economica.

[Boudon, 1992] **Philippe Boudon** (1992), Introduction à l'architecturologie, Paris, Dunod.

[Gardner, 2000] **Edwin Gardner** (2009), Reasoning in Architecture, About the Diagrammatic Nature of Thinking with Real and Imagined Objects, Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Explore-lab.

[Guibert 1987] **D. Guibert,** (1987), Réalisme et architecture, Éditions Mardaga, Bruxelles, Belgique.

[Hileman, 1998] **Rhodes Hileman** (1998), Design Methods: seeds of human futures, New York and Chichester.

[Ichbiah, 2007] **Daniel Ichbiah** (2007), les mots de l'informatique 3ème édition, compus Press.

[Jones, 1970] **John Christopher Jones** (1970), Design Methods: second edition, Acid Free Paper.

[Kittler, 2002] **Richard Kittler & Richard Kittler**, CIE general sky standard defining luminance distributions, Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences.

[Lebahar, 1983] **Jean-Charles Lebahar** (1983), Le dessin d'architecture ; simulation graphique et réduction d'incertitudes, édition parenthèses.

[Lebahar, 2007] **Jean-Charles Lebahar** (2007). La conception en design industriel et en architecture. Désir, pertinence ; coopération et cognition, édition Lavoisier-Hermès.

[Lejeune, 2010] **Michel LEJEUNE (2010),** Statistiques : la théorie et ces applications. Deuxième édition, Springer-Verlag Paris.

[Mazouz, 2008] **Saïd Mazouz, (2008).** Eléments de conception architecturale, Office des publications universitaires, Place Centrale de Ben-Aknoun, Alger, Algérie.

[Micheaux, 2011] **Pierre Lafaye Micheaux** (2011), Le Logiciel R: Maîtriser Le Langage Effectuer Des Analyses Statistiques, édition Springer.

[Narboni, 2006] **Roger Narboni** (2006), lumière et ambiances ; concevoir des éclairages pour l'architecture et la ville, édition le moniteur.

[Narboni, 2003] **Roger Narboni** (2003), La lumière et le paysage ; Créer des paysages nocturnes, édition le moniteur.

[Philips, 2004] **Derek Philips** (2004), Daylighting ; natural light in architecture, edition Architectural Press.

[Popper, 2000] **Karl Popper** (2000), the Logic of Scientific Discovery, édition Routledge Classics.

[Popper, 2005] **Karl Popper** (2005), Unended Quest: an intellectual autobiographie, edition Routledge.

[Prost, 1995] **Prost Robert** (1995), concevoir, créer, inventer ; réflexion sur les pratiques, édition l'Hermattan, collection villes et entreprises.

[Prost, 2000] **Prost Robert** (2000), Conception architecturale : une investigation méthodologique, édition L'Hermattan.

[Quintrand, 1985] **Paul Quintrand** (1985), La CAO en Architecture, Hermès.

[Raynaud, 2002] **Raynaud Dominique** (2002), Cinq essais sur l'architecture ; Etudes sur la conception de projets de l'Atelier Zô, Scarpa, Le Corbusier, Pei, édition L'Harmattan.

[Reiter, 2004] **Sigrid Reiter & André de Herd** (2004), éclairage naturel des bâtiments, UCL presses universitaires de Louvain.

[Roberta, 1997] **Corvi Roberta** (1997), an introduction to the thought of Karl Popper, édition Routledge.

[Remiche, 2007] **Bernard Remiche** (2007), Brevet, innovation et intérêt général, édition Larcier.

[Vandeplanque, 1984] **P. Vandeplanque** (1984), L'éclairage ; notions de base projets d'installation, édition technique et documentation « lavoisier ».

[XSillion,] **Francois XSillion, Claude Puech**, Radiosity: Global Illumination, The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics.

Liste des thèses de Doctorat :

[Adolphe, 1991] **L. Adolphe (**1991), L'aide à la décision technique dans la conception architecturale, Thèse de Doctorat, École des Mines de Paris (France).

[Bonnefoi, 1999] **Pierre-François Bonnefoi** (1999), Techniques de satisfaction de contraintes pour la modélisation déclarative. Application à la génération concurrente de scènes, université de Limoges.

[Chain, 2004] **Cyril Chain**. (septembre 2004), thèse sur la caractérisation spectrale et directionnelle de la lumière naturelle, Institut National des sciences Appliquées de Lyon.

[Compagnon, 1994] **Raphaël Compagnon** (1994), Simulations numériques de systèmes d'éclairage naturel à pénétration latérale, école polytechnique fédérale de Lausanne.

[Darula, 1998] **Stanislav Darula (1998),** A set of standard skies : characterizing daylight conditions for computer and energy conscious design: Final report.

[Gallas, 2009] **Mohamed-Anis Gallas** (1999), Lumière naturelle en phase de conception : quels outils/méthodes pour l'architecte, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.

[Houpert, 2003] **Sylvain Houpert** (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.

[Jaubert, 2008] **Benoît Jaubert** (2008), Outils pour les jeux sur ordinateur : Prise de connaissance de scènes 3D, Université de Limoges.

[Maamari, 2005] **Fawaz Maamari** (2005), La simulation numérique de l'éclairage : limites et potentialités, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[Marion, 1996] **Marion D. E. Hiller** (1996), TRNSHD: A program for shading and insolation calculations, University of Wisconsin (Madison).

[Miguet, 2000] **Francis Miguet** (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.

[Pinel, 1997] **Véronique Pinel** (1997), Apport de la modélisation du transfert radiatif pour l'étude des écosystèmes forestiers par télédétection, université Paul Sabatier de Toulouse III.

[Poulingeas, 2004] **Patrick Poulingeas** (2004), Spécification déclarative de l'ambiance d'une scène, Faculté des sciences et techniques, Université de Limoges.

[Salle, 2007] **Nadia Salle** (2007), Conception de la matérialisation en architecture: l'expérimentation comme facteur d'innovation industrielle, Ecole Doctorale IAEM-Lorraine (France).

[Siret, 1997] **Daniel Siret** (1997), Proposition pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural ; Application à l'ensoleillement. Spécialité Sciences de l'Ingénieur Option Architecture Filière doctorale : Ambiances architecturales et urbaines.

[Tourre (2007)] **Vincent TOURRE (2007),** Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural, École Polytechnique de l'Université de Nantes.

Liste des Articles scientifiques :

[Achten, 2003-2007] **Henri Achten,** Design methods and design theory for architectural design management, ADMS selected work 2003-2007.

[Adolphe, 1994] **L. Adolphe** (1994), A Computer Aided Learning Integration System for Architectural Engineering Education: the CALIN Project, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France).

[Alencar] **Alencar, D.D. Cowan, C.J.P. Lucena,** A FormalApproach to Architectural Design Patterns, Computer Science Department, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

[Arrouf, 2006] **Abdelmalek Arrouf & Abdelkader Bensaci (2006**), How designers design: an experimental study of architectural designing process, Courrier du Savoir – N°07, Décembre 2006.

[Ashdown, 2001] **I**. **Ashdown** (1994), Thinking photometrically Part II.1.05. Las Vegas: workshop-Lightfair International, 42 p.

[Augoyard, 2008] **Jean-François Augoyard** (2008), Faire une ambiance, Ecoles Nationales Supérieures d'Architecture de Grenoble et de Nantes.

[Bayazid, 2004] **Nigel Cross** (2004**),** Expertise in design: an overview, The Open University's repository of research publications and other research outputs.

[Bayazid, 2004] **Nigan Bayazit** (2004), Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research, Massachusetts Institute of Technology, Design Issues: Volume 20, Number 1 Winter 2004.

[Beckers, 2004] **Benoit Beckers** (2004), Le diagramme solaire.

[Beugnard, 1998] **Antoine Beugnard** (1998), Introduction au génie logiciel, ENST Bretagne.

[Blanchot, 1999] **Fabien Blanchot** (1999), « La Connaissance Objective » de Karl Popper : principales thèses et apports pour les recherches en gestion, Université de Paris IX Dauphine.

[Boudon, n° 82] **Philippe Boudon**, « échelle » en architecture et au-delà ; mesurer l'espace ; dépasser le modèle géométrique, les annales de la recherche urbaine n° 82.

[Boudon, 1993] **Boudon Philippe** (1993), 'Conception et projet', in Dir. A. Soulez, L'architecte et le philosophe, Liège : Mardaga.

[Blanchenay, 2005] **Patrick Blanchenay** (2005), Les sciences sociales dans la philosophie de Karl Popper: la cohérence du système poppérien, Institut d'études politiques de Paris.

[Bousquet, 2008] **Lydie du Bousquet** (2008), Processus de développement Cycles de vie, université Joseph Fourier Grenoble.

[Broadbent, 1969] **Broadbent Geoffrey,** methodology in the service of delight, Head of School of Architecture, Portsmouth Polytechnic, King Henry 1 Street, Portsmouth.

[Broadbent, 1981] **Geoffrey Broadbent** (1981)**,** in Design: Science: Method.

[Chaabouni, 2007] **Salma Chaabouni, Jean-Claude Bignon et Gilles Halin (2007)**, Conception des ambiances lumineuses : Navigation et raisonnement par l'image pour la formulation des intentions, Ecole d'Architecture de Nancy

[Chelkoff, 1992] **G. Chelkoff** & **J.P. Thibaud**, (1992), Les mises en vue de l'espace public, Rapport technique, Centre de recherche sur l'espace sonore et l'espace construit, École d'architecture de Grenoble.

[Chetto,] **Maryline Chetto**, Langages de programmation, université de Nantes.

[Cross, 2002] **Nigel Cross** (2002)**,** Designing Design (Research) 3 Design as a Discipline: De Montfort University 'The Inter-disciplinary Design Quandary' Conference 13th February 2002.

[Cross, 2001] **Nigel Cross** (2001), Designerly Ways of Knowing: Design Discipline versus Design Science, The Open University's repository of research publications and other research outputs, 2001.

[Cross, 1982] **Nigel Cross, John Naughton and David Walker,** Design method and scientific method, The Open University, Walton Hall, Milton Keynes, UK, vol 2 no 4 october 1981.

[Cross, 1993] **Nigel Cross** (1993)**,** science end design methodology ; a review, Design Discipline, Faculty of Technology. The Open University, Milton Keynes, UK, 1993.

[Codoguet, 1995] **Philippe Codoguet** (vol. 14 no. 6 / 1995), programmation logique avec contraintes : une introduction, publie dans RAIRO Technique et Science Informatiques.

[Cohen, 1988] **M. F. Cohen, S. E. Chen, J. R. Wallace, D.P. Greenberg** (1988), A progressive refinement approach to fast radiosity image generation.15th annual conference on computer graphics and interactive techniques. ACM Press New York. pp. 75-84.

[Colin, 1998] **C. Colin, E. Desmontil, J-Y. Martin, J-P, Mounier,** Modèle Utilisateur d'un Modeleur Déclaratif, Université de Nantes.

[Chadwell, 1997] **R. Chadwell** (1997), The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System, August 14, 1997.

[Costa, 1999] **A-C. Costa, A-A. Sousa, et F-N**. **Ferreira** (1999a), Lighting design: A goal based approach using optimization. In Rendering Techniques.

[Capeluto, 2005] **I. Guedi Capeluto, Abraham Yezioro, Tamar Bleiberg and Edna Shaviv** (2005), from computer models to simple design tools: solar rights in the design of urban streets, Technion Israel Institute of Technology.

[Capeluto, 2006] **I. Guedi Capeluto, Abraham Yezioro, Tamar Bleiberg and Edna Shaviv** (2006), Solar Rights in the Design of Urban Spaces, Technion Israel Institute of Technology.

[Crowley, 1999] **James L. Crowley**, (1999). Analyse et Synthèse d'Images pour l'Interaction Homme Machine, DEA ISC.

[Deroisy, 2011] **B. Deroisy & A. Deneyer** (18/03/2011), Les Dossiers du CSTC, laboratoire 'Lumière et Bâtiment', CSTC.

[Dorst,]**Kees Dorst,** Design Méthod Groupe, Université technique de Delft, Faculté de génie de la conception industrielle.

[Dorst, 2001]**Kees Dorst** (2001), Creativity in the design process ; co-evolution of problem–solution, Faculty of Industrial Design Engineering, Delft University of Technology, Design Studies Vol 22 No. 5 September 2001.

[(DMG) Newsletter, 1968] **DMG Design Methods Group** (1968), First Annual International Conference Purpose and Program, MIT (Cambridge, MA: June 2–4, 1968).

[Fontoynont, 1998] **Marc Fontoynont** (1998), Daylight performance of buildings, James and James Publisher.

[Fontoynont, 1991] **Marc Fontoynont** (1991), Le point sur les méthodes de simulation et sur l'utilisation de l'image de synthèse en éclairage. LUX.

[Francioli, 2001] **D. Francioli, J.-J. Meyer, L. Michel, H. Kerkhoven** (2001), Test visuel sur écran pour optimiser les conditions lumineuses, Laboratoire d'ergonomie visuelle (LEV), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

[Frantz, 2003] **Roger Frantz** (2003)**,** Herbert Simon :Artificial intelligence as a framework for understanding intuition, Department of Economics, San Diego State University, San Diego, CA 92182, USA, Journal of Economic Psychology 24 (2003) 265–277.

[Fruitet, 1999] **Jean Fruitet** (1999), Introduction à l'informatique et programmation en langage C, I.U.T. de Marne-La-Vallée.

[Gibson, 1986] **J.J. Gibson**, (1986), the ecological approach to visual perception, Lawrence Erlbaum Associates.

[Gaillard] **Jean-Jacques Gaillard & Olivier Politano** (), La simulation numérique : un outil puissant au service de la recherche, Centre de Ressources Informatiques & Laboratoire de Recherches sur la Réactivité des Solides, UMR 5613 CNRS-Université de Bourgogne.

[Gérard, 2002] **Pierre Gérard** (2002), Processus de Développement Logiciel Cours M14, Université de Paris

[Gérard, 2008] **Pierre Gérard** (2008), Génie Logiciel: Principes et Techniques, Université de Paris.

[Grin, 2011] **Richard GRIN** (2011), Interfaces graphiques : introduction, Université Sophia Antipolis, Nice (France).

[Gunéa, 1997**] F.Gunéa**, Le raisonnement par classification appliqué à la CAO, Rapport d'habilitation à diriger les recherches, Université de Caen, 16 Mai 1997.

[Habert] **Olivier Habert** (), Programmation Orientée Objet (POO), Université de Metz.

[Hall, 1981] **E-T. Hall** (1981). La dimension cachée (The Hidden Dimension), Éditions du Seuil, Première édition 1978.

[Haubruge, 2012] **Corentin Haubruge &Magali Bodart** (2012), Formations METRICS : Modélisation et simulation de l'éclairage naturel au moyen de VELUX Daylight Visualizer, Université catholique de Louvain, 2012.

[Hegron] **Gérard Hegron** (), Conception architecturale et modélisation déclarative, CERMA UMR CNRS 1563, École d'Architecture de Nantes

[Hileman, 1998] **Rhodes Hileman** (1998), Design Methods: seeds of human futures: By John Chris Jones 1970, John Wiley and Sons, New York and Chichester.

[Hugues, 2002] **Anne-Marie Hugues** (2002), Différents modèles de cycle de vie, Polytech'Nice Sophia.

[Husserl, 2000] **E. Husserl** (2000), L'idée de la phénoménologie : Cinq leçons, Presses Universitaires de France.

[Ibarra, 2010] **Diego Ibara** (2010), Using ECOTECT for Exterior Qualitative Solar Analysis: Direct Shading Analysis, Harvard Design School.

[Jones, 1970] **John Chris Jones, John Wiley and Sons** (1970), New York and Chichester, Design Methods: seeds of human futures.

[Jolivet, 2002] **V. Jolivet, D. Plemenos et P**. **Poulingeas** (2002), Inverse direct lighting with a Monte-Carlo method and declarative modelling, International Conference on Computational Science.

[Jolivet, 2006] **V. Jolivet, D. Plemenos, P. Poulingeas (),** Declarative Approach of Inverse Direct Lighting Problems, MSI Laboratory, Limoges (France).

[Jusselme,2009] **Thomas Jusselme** (2009), Simulations numériques & Architecture, ingénierie d'éco-conception.

[Kabre, 1998] **Chitrarekha Kabre** (1998), WINSHADE: A computer design tool for solar control, department of architecture - University of Queensland - Australia.

[Karayel, 1983] **M. Karayel, M. Navvab, E. Ne'eman and S. Selkowitz (1983),** Zenith luminance and sky luminance distributions for daylighting calculations, Lawrence Berkeley Laboratory: University of California.

[Khemlani, 1995] **L. Khemlani** (1995) GENWIN: A Generative Computer Tool for Window Design in Energy-Conscious Architecture, Building and Environment; Vol 30 n°1.

[Kittler, 2002] **Stanislav Darula & Richard Kittler,** CIE general sky standard defining luminance distributions, Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences.

[Kunz, 1970] Werner Kunz & Horst W. J. Rittel (1970), Issues as elements of information systems, Working Paper No. 131.July 1970, Heidelberg, Germany & University of California, Berkeley.

[Lebahar, 2007] **Lebahar Jean-Charles (**2007), la conception en design industriel et en architecture, Hermès science publications, Paris.

[Lebahar,] **Lebahar Jean-Charles**, L'analyse de l'activité de conception : situations professionnelles, situations didactiques, perspectives, Aix-Marseille Université.

[Lebahar, 2006] **Lebahar Jean-Charles** (2006), Pratique professionnelle et enseignement de la technique d'organigramme en architecture ; problèmes de transposition didactique (n°29 - décembre 2006 - p. 9/40), «DIDASKALIA».

[Leplat, 2008] **Jacques Leplat** (2008), Lebahar, J.-C. (2007). La conception en design industriel et en architecture. Désir, pertinence, coopération et cognition. Paris : Hermès Sciences. Lavoisier. 302 p.

[Lebahar, 1983] **Jean Charles Lebahar** (1983), le dessin d'architecte, Parenthèse.

[Laurent, 2007] **Guillaume Laurent** (2007), Introduction au génie logiciel, ENSMM.

[Mahdavi] **Ardeshir Mahdavi ()**, Notes on representation in computer-aided architectural design, Vienna University of Technology.

[Mammeri, 2002] **Z. Mammeri** (2002), Introduction aux méthodes et cycle de développement du logiciel, Université Paul Sabatier, Toulouse III.

[Mammeri, 2002] **F. Maamari, M. Fontoynont** (2002), Use of IEA-SHC Task 21 C benchmarks to assess performance of Lightscape 3.2 in daylighting calculations.EPIC, Lyon, France.

[Markov, 1954] **A. A. Markov (**1954), The theory of algorithms, Trudy Mat. Inst. Steklov., **42**, Acad. Sci. USSR, Moscow–Leningrad.

[Mahdavi, 1995] **Ardeshir Mahdavi & L. Berberidou-KallikovA** (1995), A generative simulation tool for architectural lighting, Fourth International Conference of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA).

[Marks, 1997] **J. Marks, B. Adalaman, P-A. Beardsley, W. Free-man, S. Gibson, J-K. Hodgins, T. Kang, B. Mirtich, H. Pfister, W. Ruml, K. Ryall, J. Seims et S-M. Shieber** (1997), Design galleries: A general approach to setting parameters for computer and animation, SIGGRAPH'97 Conference Proceedings, Addison Wesley.

[Marschner, 1997] **S. R. Marschner et D. P. Greenberg** (1997), Inverse lighting for photography, Fifth Color Imaging Conference, Society for Imaging Science and Technology.

[Marion, 1996] **D-E. Marion Hiller** (1996), TRNSHD: A program for shading and insolation calculations, University of Wisconsin (Madison).

[Merleau-Ponty, 1945] M. Merleau-Ponty, (1945), Phénoménologie de la perception, Gallimard (2003).

[Massie, 1992] **Jean-Marc Massie** (1992), Intelligence artificielle et société : l'idéologie du système expert, In: quaderni. n. 18, automne 1992. les espaces publics. pp. 51-60.

[Miguet, 2000] **Francis Miguet** (2000), Paramètres physiques des ambiances architecturales: u modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.

[Minh, 2005] **Bui-Nguyen Minh** (2005), Synthèse d'images réalistes couplant lancer de rayons et radiosité, Institut de la Francophonie pour l'Informatique, Hanoï.

[Mitanchey, 1996] **R. Mitanchey** (1996), Synthèse d'images appliquée à l'éclairagisme intérieur des bâtiments, thèse en informatique, spécialité images. Saint-Etienne : l'école Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, p200.

[Morel, 1994] **N. Morel, S. Citherlet, A. Faist, E. Forte, B. Marchand (**1994), BatMan, A Computer Aided Learning Module for Architecture Students, European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France).

[Morineau, 2002] **Bernard Morineau & Jean-Pierre Clairand** (2002), de la conception assistée à la réalité virtuelle, rapport bibliographique.

[Muller, 2004] **Philippe Muller** (2004), Introduction à la programmation fonctionnelle, Paris

[Mueller, 1996] **C. G. Mueller** & **M. Rudolph** (1966), Light and Vision, Time, inc., New-York.

[Le Moigne, 1991] **J.-L. Le Moigne** (1991)**,** 'L'échelle, cette correction capitale', in Dir. Ph. BOUDON, De l'architecture à l'épistémologie, la question de l'échelle, Paris.

[Ninio, 1991] **J. NINIO** (1991), L'empreinte des sens : Perception, mémoire, Langage, Éditions Odile Jacob, Paris (France).

[Perez, 1993] **R. Perez, R. Seals and J. Michalsky** (1993), all-weather model for sky luminance distribution-preliminary configuration and validation, Atmospheric Sciences Research Center, State University of NewYork.

[Piaget, 1959] **J. Piaget** (1959), Historique des facultés et des instituts, librairie de l'université Genève.
Jean-Pierre Protzen and David J. Harris (2010), the universe of design Horst Rottel's Theorie of design and planning, édition Routledge, park Square, Milton Park, Abingdon, Oxan.

[Paule, 1995] **B. 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, 1990] **Bernard Paule & Jean-Louis Scartezzini** (), Leso-DIAL: outil d'aide à la conception en éclairage naturel, Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment, LESO-PB / EPFL, CH-1015 Lausanne.

[Pecquet, 2003] **Lancelot Pecquet** (2003), Programmation Fonctionnelle Introduction illustrée en Objective Caml, Université Paris XII, Licence d'Informatique.

[Perovich,] **Daniel Perovich, Maria Cecilia Bastarrica and Cristian Rojas**, Aspect-Oriented Model-Driven Approach to Architecture Design, Department of Computer Science, Universidad de Chile.

[Poirier, 2005] **Franck Poirier, Igor Schadle** (2005), Interfaces Réduites pour l'Entrée de Texte: État de l'Art et Présentation du Communicateur Sibylle pour l'Aide à l'Ecriture de Personnes Handicapées, Laboratoire IRIT, Toulouse (France).

[Poulin, 1999] **Pierre Poulin & Alain Four** (1999). Lights from Highlights and Shadows, Department of Computer Science, University of British Columbia.

[Quinet, 1994] **Catherine Quinet,** Herbert Simon et la rationalité, In: Revue française d'économie. Volume 9 N°1, 1994. pp. 133-181.

[Raynaud, 1990] **Raynaud Dominique** (1990), L'imagination architecturale, 1. Méthodologie et études, 2. Essai de schématologie, thèse de doctorat, Grenoble, Université des sciences sociales.

[Raynaud, 1994] **Raynaud Dominique** (1994), Chinoiseries architecturales, ou la question de la figurativité en architecture, Vers une architecturologie expérimentale, Rapport d'activité 1994 (Programme de recherche quadriennal 1994-1997), LAREA/LOUEST, CNRS UMR 7544, Paris

[Raynaud, 1999] **Raynaud Dominique** (1999), Le schème: opérateur de la conception architecturale, Laboratoire d'architecturologie et de recherches épistémologiques sur l'architecture, édition Arquitetura Revista (São Leopoldo).

[Raynaud, 2003] **Raynaud Dominique (**2003), Le schème, d'un point de vue nominaliste et pragmatiste, édition L'Harmattan.

[Raynaud, 2004] **Raynaud Dominique** (2004), Contrainte et liberté dans le travail de conception architecturale, Revue française de Sociologie.

[Recanati, 2007] **Catherine Recanati** (2007), Programmation Impérative Polycopié de cours n° 1, Université Paris 13.

[Revy, 2012] **Guillaume Revy** (2012), Introduction à la Programmation Orientée Objet... et son application au C++, Université de Perpignan Via Domitia.

[Ritchey, 2004] **Tom Ritchey** (2004), Wicked Problems: Modelling Social Messes with Morphological Analysis, Swedish Morphological Society.

[Ritchey, 2005] **Tom Ritchey** (2005)**,** Wicked Problems; Structuring Social Messes with Morphological Analysis, Swedish Morphological Society, 2005-2011

[Roth, 1999]**Susan Roth** (1999)**,** The State of Design Research, Design Issues, Vol. 15, No. 2, Design Research (Summer, 1999), pp. 18-26, Published by: The MIT Press.

[Roberts,] **Andrew Roberts & Andrew Marsh,** ECOTECT: Environmental Prediction in Architectural Education, Cardiff University, Wales.

[Rogora, 1996] **A. Rogora & G. Scudo** (1996), Proposal for a Light Language in Architectural Planning, Fourth European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Berlin (Germany).

[Rusinkiewicz, 2002] **Szymon Rusinkiewicz** (2002), Local Illumination, Reflection, and BRDFs, Princeton University.

[Scartezzini, 1991] **J.L. Scartezzini** (1991)**,** L'éclairage naturel dans le bâtiment ; Proceedings

CISBAT'91, 10-11/10/91, EPFL, Lausanne.

[Scartezzini, 1993] **Jean Luis Scartezzini, G. Compagnon, G. Ward, B. Paule** (1993), Outils Informatiques en Lumière Naturelle, Université de Genève, EPFL.

[Schoeneman, 1993] **Chris Schoeneman. Julie Dorsey. Brian Smits. James Arvo et Donald Greenberg** (1993), Painting with light, Program of Computer Graphics, Cornell University.

[Silvestrini & S. Cacopardi, 1993] **G. Silvestrini, S. Cacopardi** (1993), Use of an Expert System for Passive Cooling Building Design, Third European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Florence (Italy).

[Simon, 1979] **Herbert Simon** (1979), Models of thought, New Haven, Yale University Press.

[Simon, 1997] **Herbert Simon** (1997), Administrative behavior : 4th edition, New York: Free Press.

[Simon, 2006 **J. Simon & J. Stillemans** (2006), Mots théoriques et choses architecturales, Opérandes et opérateurs de la conception, édition.

[Siret, 2011] **Daniel SIRET** (2011), Les enveloppes solaires de RALPH KNOWLES, ou Les ambivalences d'un modèle de régulation des formes urbaines, Laboratoire CERMA – UMR CNRS 1563, ENSA Nantes (France)

[Stannord, 1998] **S. Stannord** (1998), Computer in design: exploring light and time. In ACADIA 98 proceedings: Do Computers Makes a Difference in Design Studio? , pages 26-35.

[Stevens, 1990] **G. Stevens** (1990), The Reasoning Architect: Mathematics and Science in Design, McGraw-Hill International Editions, New-York (USA).

[Stone, 1972] **Harold S. Stone** (1972), Introduction to Computer Organization and Data Structures, McGraw-Hill, New York.

[Sosnov, 2002] **A. Sosnov, P. Macé et G. Hégron** (2002). Semi metric formal 3d reconstruction from perspective sketches, International Conference on Computational Science.

[Syarief, 2002] **Achmad SYARIEF & Haruo HIBINO** (2002), Evaluating the Semantic Approach through Horst Rittel's Second-Generation System Analysis, Graduate School of Science and Technology Chiba University, Japan.

[Tarpin-Bernard] **Franck Tarpin-Bernard, T-David Bertrand** (), Expression et Reconnaissance des Intentions Conceptuelles Apports de la Multimodalité, Laboratoire GRACIMP - Ecole Centrale de Lyon (France).

[Tisseau, 2000] **Jacques Tisseau** (2000), programmation en logique; Le langage Prolog, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest.

[Vartiainen, 2000] Eero Vartiainen, 2000. Electricity benefits of daylighting and photovoltaics for various solar facade layouts in office buildings, Energy and Buildings.

[Ware, 2004] **C. Ware**, (2004), Information visualization : Perception for Design, Elsevier Publishing Company Limited, San Francisco.

[Weber, 1834] **E-H. Weber** (1834), De pulsu, resorptione, auditu et tactu. Annotationes anatomicae et physiologicae. Leipzig: Koehler.

[Whitted, 1980] **T. Whitted** (1980), An improved illumination model for shaded display, Computer graphics & Image processing.

[Yann, 2010] **Régis-Gianas Yann** (2010), Génie Logiciel Avancé, Université Denis Diderot – Paris 7.

[Yeh, 1993] **U.P. Yeh & M. Schiler** (1993), Hoyt Street Yard Redevelopment Plan: a case study using an interactive computer program for defining and drawing solar envelopes: Proceedings, American Solar Energy Conference - Washington, DC.

Autres articles Consultés

Paul Quintrand, La recherche dans le domaine de la conception architecturale, assistée par ordinateur en France.

François Morain (2004), Les bases de l'informatique et de la programmation, Ecole polytechnique.

Jacques Farré (2012), Informatique Générale, Université de Nice – Sophia Antipolis.

Areski Flissi & Gilles Vanwormhoudt (2012), Programmation orientée domaine pour les services télécoms: Concepts, DSL et outillage, Rennes : France.

Guy Cousineau (2005), Les Langages de Programmation : syntaxe, sémantique et implantation, Université Denis Diderot.

Jean-Jacques Girardot (1994), Introduction à la programmation fonctionnelle par Schème, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Grégoire Allaire (2009), une introduction à la modélisation mathématique et à la simulation numérique, Département de Mathématiques Appliquées.

Nicolas Holzschuch (2007), Simulation Photoréaliste de l'éclairage en Synthèse d'Images, INRIA Grenoble Rhône-Alpes / LJK Laboratoire Jean Kuntzmann – ARTIS.

Alazard, Camus, Carette, Levert (2008), Le modèle Cascade.

B. Boehm (1981), Software Engineering Economics, Prentice-Hall.

Maude Manouvrier (2005), initiation à la programmation procédurale, à l'algorithmique et aux structures de données par le langage C, Université Paris Dauphine.

Yann Régis-Gianas (2013), Programmation procédurale, Université Denis Diderot Paris.

Jean-Jacques Girardot (1994), Introduction à la programmation fonctionnelle par Schème, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Narendra Jussien (), Logique(s) Langages Algorithmes ; module un Logique(s), Ecole des Mines de Nantes

Patrick Felix (2009), Test et Validation du Logiciel, IUT – Bordeaux.

A. **Grynberg** (1988), comparison and validation of radiance and Superlite: Rapport interne, Lawrence Berkley National Laboratory, 1988.

H. Erhorn & J. De Boer & M. Dirksmoller, ADELINE: An integrated Approach to Lighting Simulation. Daylighting ’98, Ottawa, 1998.

J.L. Scartezzini & G. Compagon & G. Ward & B. **Paul**, outils informatiques en lumière Naturelle. NEFF-435.2. Université de Genève, EPFL, 1993, p142.

Nadine Adra & Fawaz Maamari (2007), Recensement et analyse des outils utilisés dans le cadre d'une démarche HQE et développement d’une méthodologie d’aide à la décision : Rapport Final Convention n°0704C0010, Décembre 2007. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)

A.B. Khodulev, E.A. Kopylov (1996)**,** Physically accurate lighting simulation in computer graphics software.GraphiCon’96: The 6th International Conference on Computer graphics and Visualization, St. Petersburg, Russia, 1996, pp. 111-119.

Grégoire Chelkoff (1999). Cours sur Les formes sensibles de l'espace public, Ecologie de l'environnement construit, Grenoble Nantes.

Michel Aubes (2012). Grandeurs et unités de mesure, université de toulouse, france.

Stephen Watt, Interview – Nigel Cross, Rotman Magazine, Rotman School of Management, University of Toronto.

Werner Kunz and Horst W. J. Rittel, ISSUES AS ELEMENTS OF INFORMATION SYSTEMS, Working Paper No. 131July 1970, Reprinted May 1979.

Nigel Cross, Design Cognition : Results From Protocol And Other Empirical Studies Of Design Activity, Department of Design and Innovation,The Open University, Milton Keynes, UK,

Nigel Cross, Design thinking as a form of Intelligence, The open University, Milton Keynes, UK,

Nigel Cross, Creativity in the design process ; co-evolution of problem–solution, Department of Design and Innovation, Faculty of Technology, The Open University, Milton Keynes MK7 6AA, UK

H.W.J. Rittel & M.M. Webber (1973), Dilemmas in a General Theory of Planning, Policy Sciences 4 (1973), 155-169 Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Printed in Scotland.

Herbert A. Simon (1955**),** A Behavioral Model of Rational Choice, The Quarterly Journal of Economics, Vol. 69, No. 1. (Feb., 1955), pp. 99-118.

Herbert A. Simon (1962), The Architecture of Complexity, Proceedings of the American Philosophical Society, Vol. 106, No. 6. (Dec. 12, 1962), pp. 467-482.

Juha-Pekka Soinien (2004), Architecture dsign methods for application domain-specific integrated computer systems, ESPOO 2004, VTT Publications 523. Technical Research Centre of Finland.

Sites internet

www.abbassa.wordpress.com

http://archimede.bibl.ulaval.ca

http://apps1.eere.energy.gov

http://www.autodesk.fr

http://www.asstsas.qc.ca

http://www.buzzactu.fr

http://www.cidehom.com

http://www.colorimetrie.be

http://www-climat.arch.ucl.ac.be

http://www.curiosphere.tv

http://cat.inist.fr

http://www.lkb.ens.fr

http://logiciels.i3er.org

http://www.luxion.com

http://www.leedsmet.ac.uk

http://www.lightscape.com

http://malaguarnera-psy.wifeo.com

http://www.mediadico.com

http://www.mediadico.com

http://nisaes.over-blog.com

http://www.optymis.com

http://patrick.kohl.pagespersoorange.fr

http://www.psychoweb.fr

http://ressources.univ-lemans.fr

http://semsci.u-strasbg.fr

www.sunearthtools.com

http://www.techno-science.net

http://www.uel-pcsm.education.fr

http://www.uelpcsm.education.fr

http://www.unice.fr

http://physique.unice.fr

http://qsee-superlite.software.informer.com

http://radsite.lbl.gov

http://www.squidoo.com

http://www.scriptol.fr

http://www.sig.fr

http://univers-iles.pagesperso-orange.fr

http://www.utc.fr

http://www.dictionnaire.phpmyvisites.net

http://www.dial.de/DIAL/fr/dialux.html

http://www.deptinfo.labri.fr

http://www.dicofr.com

www.dico-definitions.com

www.dictionnaire.net

http://www.deluminaelab.com

www.debian.org

http://eduscol.education.fr

http://www-energie2.arch.ucl.ac.be

http://www-energie.arch.ucl.ac.be

http://www.energieplus-lesite.be

http://www-energie.arch.ucl.ac.be

http://www.erco.com

http://www.erudit.org

http://www.Futura-sciences.com

http://fr.answers.yahoo.com

http://www.grenoble.archi.fr

http://www.interstices.info

http://www.innoviscop.com

http://www.infeig.unige.ch

http://www.indal-lighting.fr

http://www.iea-adeline.de

http://www.integra.jp

http://www.ibp.fraunhofer.de

http://www.larousse.fr

http://www.lcf.institutoptique.fr

http://lettres.ac-orleans-tours.fr

http://www.linternaute.com

http://viz.velux.com

http://www.youtube.com

http://www.3dvf.com