



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
ÉCOLE DOCTORALE IAEM LORRAINE
DFD Informatique
Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie
(UMR CNRS/Culture n°3495 MAP)
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

Thèse pour l'obtention du titre de :

Docteur de l'Université de Lorraine
Discipline : Sciences de l'architecture

par

Mohamed-Anis GALLAS

DE L'INTENTION À LA SOLUTION ARCHITECTURALE

PROPOSITION D'UNE MÉTHODE D'ASSISTANCE À LA
PRISE EN COMPTE DE LA LUMIÈRE NATURELLE
DURANT LES PHASES AMONT DE CONCEPTION

Soutenance publique le 06 Septembre 2013

Composition du jury

Président :	M. Ye-Qiong SONG	Professeur HDR Université de Lorraine
Rapporteurs :	Mme. Catherine SÉMIDOR	Professeur HDR ENSAP-Bordeaux
	M. Pierre LECLERCQ	Ingénieur-Architecte, Professeur Université de Liège
Examineur :	M. Gérard HÉGRON	Directeur de recherche HDR IFSTTAR
Directeur de thèse :	M. Gilles HALIN	Maître de conférence HDR Université de Lorraine
Co-directeur de thèse :	M. Jean-Claude BIGNON	Architecte, Professeur HDR ENSA-Nancy

Résumé

De l'intention à la solution architecturale. Proposition d'une méthode d'assistance à la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases amont de conception.

La lumière naturelle éclaire l'espace architectural créant les conditions nécessaires pour accueillir des activités humaines. La fonction d'éclairage de la lumière naturelle est associée à une autre dimension plus sensible attribuant une identité et une singularité à l'espace conçu. La maîtrise du comportement lumineux est une activité complexe qui fait appel à une multiplicité de facteurs dont la caractérisation est confrontée à l'incertitude et l'imprécision des informations disponibles durant les phases conceptuelles du projet d'architecture.

Il existe plusieurs méthodes et outils qui proposent une assistance à la maîtrise des phénomènes d'éclairage naturel dans le cadre du processus de conception architectural. L'évaluation de ces méthodes et outils montre qu'ils ne sont pas adaptés à un accompagnement des activités de conception durant les phases initiales du projet d'architecture.

L'objectif de notre recherche est de proposer une méthode d'assistance qui prend en considération les propriétés de cette phase de conception pour aider le concepteur à intégrer ses intentions d'ambiance de lumière naturelle et à l'accompagner dans le développement de son projet.

Nous proposons une méthode d'assistance structurée selon un processus déclaratif permettant au concepteur d'explicitier ses intentions d'effets de lumière naturelle et de les traduire en solutions architecturales potentielles qu'il peut intégrer dans son projet. Cette méthode considère les intentions d'ambiance de lumière naturelle comme une information source à utiliser pour proposer une aide à la conception pendant les phases préliminaires du projet où elles constituent les seules informations disponibles. Cette méthode offre des fonctionnalités capables de gérer l'incertitude qui caractérise les phases de recherche et de formalisation d'idées.

Notre méthode d'assistance a été implémentée dans le prototype d'outil d'assistance *DaylightGen* faisant appel à trois composants logiciels. Le premier composant *Day@mbiance* est un outil de navigation dans une base d'images référencées qui permet à l'utilisateur de sélectionner d'une manière interactive les images correspondant à ses intentions. Le deuxième composant *DaylightBox* identifie et caractérise les intentions du concepteur issues de la navigation dans la base d'images pour lancer le processus de génération des solutions. Ces solutions sont visualisées en utilisant le composant *DaylightViewer* qui offre la possibilité de parcourir et de sélectionner celles qui sont pertinentes pour le concepteur. Ce composant permet aussi d'évaluer le comportement des effets lumineux générés par ces solutions et de modifier leur configuration.

L'apport cognitif de cette méthode et la capacité d'accompagnement des activités de conception de l'outil d'assistance développé ont été évalués et analysés dans un cadre expérimental de conception de projet.

Mots clés :

Assistance à la conception architecturale, phase amont de conception, lumière naturelle, simulation, processus génératif, modélisation paramétrique.

Abstract

From intention to architectural solution. The proposal of a support method to integrate daylight during the early design steps.

The daylight illuminates the architectural space and creates the necessary conditions to accommodate human activities. The illuminating function of daylight is joined to another sensitive dimension that attributes a distinctive identity to the designed space. The control of daylight in architectural environment needs some detailed and precise characteristics about aperture and walls features. The multiplicity of these characteristics is faced with the inaccuracy and the uncertainty of the design information available during the early steps.

There are many design methods and tools that provide an assistance to integrate the daylight phenomena in design process. The evaluation of these design assistance methods and tools shows that that they are not suitable to support design activities during the early steps. Our research aims to propose a design support method that takes into account the early design step features and helps designers to integrate their daylight atmosphere intentions in project.

We propose a design support method structured as a declarative modelling process. The declarative process helps the designer to declare his daylight intentions and to translate them to potential solutions that could be integrated in his project. This method considers the designer intentions as the main design information used to help designer during the early design steps. The proposed method provides functionalities that could operate the inaccuracy and the uncertainty of the ideas research and formalisation steps.

Our design support method was implemented in a prototype design support tool (*DaylightGen*) that integrates three software components. The first component (*Day@mbiance*) is a navigation tool in a referenced images base. The designer uses this interactive component to select images corresponding to his intentions. The second component (*DaylightBox*) identifies and characterises the designer intentions from the images navigation step results. This component is also used to control the solutions generation process. The generated solutions will be visualised using the last component (*DaylightViewer*) that offer the possibility to identify and select the relevant ones. This component proposes functions to evaluate the daylight behaviour and effects generated by the selected solutions. The selected solutions features could be modified using geometrical operators integrated in *DaylightViewer*.

The cognitive contribution of the design method and the ability of the implemented tool to support the design activities was evaluated and analysed in an experimental design context.

Keywords

Design support method, early design steps, daylight, daylight simulation, generative process, parametric design

À mes parents,

À mes sœurs, Yesmine et Narjess,

J'adresse mes remerciements à M. Gilles Halin, Directeur scientifique du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, qui a dirigé et encadré au quotidien mon travail de thèse. Je lui exprime, par ce texte, ma gratitude pour son implication dans cette expérience. Son aide, ses qualités pédagogiques et humaines ont conditionné la réussite de mon travail de recherche.

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Jean-Claude Bignon, co-directeur de ma thèse, qui a apporté son expertise et qui m'a aidé à finaliser mon travail de thèse dans les meilleures conditions. Je remercie également M. Didier Bur pour sa participation à l'élaboration et au suivi de ce travail.

Je remercie les membres du jury : M^{me} Catherine Sémidor, M. Pierre Leclercq, M. Gérard Hégron et M. Ye-Qiong Song pour la pertinence de leurs évaluations, leurs remarques et leurs suggestions.

Une mention très particulière à M^{me} Salma Chaabouni qui a participé à la définition et à la mise en œuvre de mon travail de recherche. Je lui exprime ma reconnaissance pour ses conseils et son aide précieuse.

Je tiens à remercier mes collègues de recherche, Kevin Jacquot et Tommy Messoudi, avec lesquels j'ai pu travailler et enrichir mes connaissances. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma grande amitié. Je remercie également mes autres collègues : Daniel Zignale, Conrad Boton et Charline Weissenstein pour leur amitié et les échanges passionnants que j'ai pu avoir avec eux.

Je pense aussi à M. Vincent Marchal, M^{lle} Aude Mourier et M. Gregory Stocky pour leur assistance et leur aide au quotidien. Je remercie également M. Pascal Humbert ainsi que l'ensemble de l'équipe du CRAI qui ont participé à mon intégration au sein du laboratoire.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux étudiants du Master Architecture, Modélisation et Environnement de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy pour leur participation à l'expérimentation de l'outil d'assistance résultant de ma recherche. Je remercie particulièrement Isabelle Cervantès pour sa participation au développement des perspectives de ma recherche.

Je remercie M^{me} Sophie Chabot, responsable du département recherche, qui m'a aidé à matérialiser mon projet de post-doctorat. Je remercie également M. Alain Caprion ainsi que l'ensemble du personnel administratif de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance au Gouvernement Tunisien et la Région Lorraine qui ont financé cette recherche.

Sommaire

INTRODUCTION	3
 PARTIE A. LUMIERE ET ARCHITECTURE	7
CHAPITRE I. LUMIERE NATURELLE EN ARCHITECTURE.....	9
1. <i>Lumière naturelle et architecture</i>	9
2. <i>Lumière naturelle et architecte</i>	15
3. <i>Synthèse</i>	19
CHAPITRE II. LA LUMIERE NATURELLE : PHENOMENE PHYSIQUE ET SENSIBLE.....	21
1. <i>La dimension physique de la lumière naturelle</i>	21
2. <i>La dimension sensible de la lumière naturelle</i>	46
3. <i>Le rapport entre la dimension physique et la dimension sensible de la lumière naturelle</i>	54
4. <i>Synthèse</i>	59
CHAPITRE III. LUMIERE ET CONCEPTION ARCHITECTURALE	61
1. <i>Caractérisation du processus de conception architecturale</i>	61
2. <i>Prise en compte de la lumière naturelle durant le processus de conception architecturale</i>	66
3. <i>Synthèse</i>	73
CHAPITRE IV. NATURE DES METHODES ET DES OUTILS D'ASSISTANCE A LA CONCEPTION	75
1. <i>Les supports d'assistance exploitant les références</i>	76
2. <i>Supports d'assistance exploitant les modèles physiques</i>	84
3. <i>Supports d'assistance exploitant les modèles numériques</i>	87
4. <i>Synthèse</i>	110
CHAPITRE V. METHODES D'ASSISTANCE ET PROCESSUS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE	113
1. <i>Méthodes d'assistance et phases du processus de conception</i>	113
2. <i>Méthodes d'assistances et acteurs de la conception architecturale</i>	116
3. <i>Synthèse</i>	124
 PARTIE B. VERS UNE METHODE D'ASSISTANCE A LA PRISE EN COMPTE DE LA LUMIERE	
NATURELLE DURANT LES PHASES CONCEPTUELLES DU PROJET D'ARCHITECTURE.....	125
CHAPITRE I. STRUCTURE DE LA METHODE D'AIDE A LA CONCEPTION	127
1. <i>Description de la méthode</i>	127
2. <i>Déclaration des intentions</i>	130

3.	<i>Caractérisation des intentions</i>	132
4.	<i>Génération des solutions</i>	145
5.	<i>Prise de connaissance</i>	146
6.	<i>Appropriation des solutions</i>	149
7.	<i>Synthèse</i>	150
CHAPITRE II. IMPLEMENTATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA CONCEPTION		151
1.	<i>Environnement d'implémentation</i>	151
2.	<i>Processus d'implémentation de l'outil (DaylightGen)</i>	154
3.	<i>Synthèse</i>	177
 PARTIE C. EXPERIMENTATION ET VALIDATION DE LA METHODE ET DE L'OUTIL D'ASSISTANCE		
.....		179
CHAPITRE I. PROTOCOLE D'EXPERIMENTATION.....		181
1.	<i>Les participants</i>	182
2.	<i>Dispositif expérimental</i>	183
3.	<i>Projet de conception</i>	184
CHAPITRE II. RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION		187
1.	<i>Analyse des sessions de conception</i>	187
2.	<i>Analyse des résultats du questionnaire</i>	196
3.	<i>Synthèse</i>	203
 CONCLUSION GENERALE		205
 REFERENCES		209
 TABLE DES ILLUSTRATIONS		215
LISTE DES FIGURES		215
LISTE DES TABLES.....		223
 TABLE DES MATIERES		225
 ANNEXES		229

Introduction

La lumière naturelle éclaire l'espace architectural créant les conditions nécessaires pour accueillir des activités humaines. La fonction d'éclairage de la lumière naturelle est associée à une fonction plus sensible attribuant une identité et une singularité à l'espace conçu. La lumière naturelle doit accompagner le processus de genèse et de formalisation du projet d'architecture dès ses premières phases de conceptualisation. Dans ces phases le concepteur possède une marge de liberté qui lui permet d'explorer le champ du possible et de proposer les meilleures réponses aux intentions formulées et aux contraintes auxquelles il est confronté.

La maîtrise du comportement de la lumière naturelle dans le milieu architectural fait appel à un ensemble de caractéristiques détaillées et précises en rapport avec les ouvertures, leurs positions ainsi que les propriétés des surfaces composant l'espace. Cette multiplicité de facteurs est confrontée à l'incertitude et l'imprécision des informations disponibles durant les phases conceptuelles du projet d'architecture.

Il existe plusieurs types de méthodes d'assistance à la conception conçus pour la maîtrise et l'étude des ambiances lumineuses. Le premier type de méthodes et d'outils a été conçu pour l'évaluation et la simulation du comportement lumineux des configurations architecturales et des dispositifs d'éclairage. Ce type d'outils nécessite des informations précises pour caractériser les modèles étudiés. Or ces informations ne sont disponibles que dans les phases avancées et détaillées limitant ainsi la participation des méthodes d'assistance au processus créatif. Le deuxième type de méthode propose des fonctionnalités permettant d'établir une continuité et un accompagnement des activités de conception. Ce type d'assistance couvre les différentes phases de conception et particulièrement les phases conceptuelles pendant lesquelles les décisions les plus importantes sont prises. Ce type de méthodes et d'outils offre des fonctionnalités capables de gérer l'incertitude qui caractérise les phases de recherche et de formalisation des idées du concepteur.

Notre travail de recherche porte sur les activités d'intégration et de prise en compte des intentions relative à la lumière naturelle durant les phases conceptuelles du processus de conception architecturale. Nous essayons d'explorer le potentiel d'assistance que peuvent apporter les méthodes déclaratives et génératives pour la maîtrise du comportement de la lumière naturelle. Il sera question de déterminer l'apport d'une assistance à la conception exploitant des solutions architecturales d'ambiances lumineuses déterminées à partir d'une formulation d'intentions. Ce travail de recherche essaye de donner une réponse à la question suivante : quel type d'assistance peut-on proposer aux concepteurs pour gérer la multiplicité et la précision des facteurs de caractérisation de la lumière

naturelle durant des phases d'incertitude et d'imprécision ?

Ce travail de thèse cherche à définir les principaux facteurs qui régissent la relation entre la lumière naturelle et l'édifice architectural ainsi que les influences mutuelles entre ces deux entités physiquement et sensiblement reliées. Nous essayons de caractériser les besoins d'assistance des activités de conception propres aux phases conceptuelles du projet. Cette caractérisation permettra d'explorer les capacités d'assistance apportées par les méthodes et les outils d'aide à la formulation des intentions et la possibilité de les associer à des méthodes et des outils de génération de solutions. Les résultats de ce travail d'investigation seront utilisés comme base pour la proposition d'une méthode d'assistance intégrant des connaissances du domaine de l'éclairage naturel et de la conception architecturale. Cette méthode sera implémentée dans un outil qui prend en considération les contraintes de la pratique de la conception architecturale et les contraintes de la maîtrise de la lumière naturelle durant les phases conceptuelles du projet.

Cette recherche vient en continuité avec d'autres travaux de recherche réalisés au sein l'équipe de recherche MAP-CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie). Parmi ces travaux celui de Salma Chaabouni (Salma Chaabouni, 2011) qui propose une méthode d'aide à la formulation et la formalisation des intentions en utilisant une base d'images composée de photographies illustrant des espaces intérieurs avec un effet de lumière naturelle particulier. Ces images sont indexées en utilisant un thésaurus portant sur la caractérisation des différentes facettes des ambiances de lumière naturelle. Cette méthode a été implémentée dans un outil de navigation dans la base d'images proposant des fonctions de parcours et de navigation répondant aux activités cognitives de recherche et de génération d'idées qui caractérisent les phases conceptuelles du projet d'architecture.

Le deuxième travail de recherche est celui de Philippe Marin (Philippe Marin, 2010) qui propose une méthode d'assistance à la conception architecturale intégrant des contraintes d'ensoleillement et exploitant les potentialités offertes par les méthodes de génération évolutionnaires. Cette méthode a été implémentée dans un outil d'assistance intégrant un algorithme de génération évolutionnaire, des opérateurs morphologiques et un moteur d'évaluation du comportement énergétique des configurations spatiales. Ces derniers permettent de proposer une collection de solutions architecturales présentant une diversité formelle et répondant à un besoin précis en particulier en terme de quantité de lumière naturelle.

Cette recherche s'intègre plus généralement dans le cadre des recherches actuelles qui essaient de définir des pistes d'assistance à l'intégration de phénomènes physiques complexes comme celui de la lumière naturelle, de la thermique ou du comportement structurel des édifices. Cet axe de recherche essaye de mettre à profit les potentialités de calcul et de résolution de contraintes offertes par les modèles numériques géométriques, les modèles génératifs et les modèles de simulation pour l'accompagnement des activités de conception architecturale caractérisant les phases amont du projet.

Mon mémoire de recherche est structuré en trois parties. La première partie essaye de construire une connaissance globale autour de la lumière naturelle et de sa relation avec l'architecture, l'architecte et les activités de la conception architecturale. La deuxième partie présente la structure de la méthode d'assistance que nous proposons ainsi que son mode d'implémentation dans un outil logiciel. Enfin, la troisième partie définit le protocole d'expérimentation que nous avons mis en place pour évaluer l'apport de la méthode et de l'outil d'assistance proposés dans un cadre de conception réel.

La première partie est structurée en trois chapitres :

- Chapitre 1 : ce chapitre introductif essaye de parcourir l'évolution historique de l'influence mutuelle entre l'architecture et la lumière naturelle. Ce parcours se fait à travers l'analyse de cas d'étude où nous avons caractérisé cette influence et repéré son incidence sur l'évolution des techniques de construction et sur l'expression architecturale. Ensuite notre attention s'est portée sur les échanges entre la lumière naturelle et l'architecte. Cette attention s'est matérialisée par l'analyse d'écrits et de réalisations d'architectes contemporains permettant de mettre en évidence la valeur expressive de la lumière naturelle.
- Chapitre 2 : le deuxième chapitre essaye d'établir une connaissance physique et sensible de la lumière naturelle et des possibilités de connexion entre ces deux domaines d'étude. Nous avons commencé par identifier les facteurs qui déterminent le comportement de la lumière naturelle en milieu architectural et son mode de variation dans le temps. Ensuite nous avons essayé de qualifier les apports lumineux en nous référant à différents domaines d'études comme la peinture, le cinéma et l'architecture. Enfin, nous avons identifié des méthodes de mises en relation du domaine de connaissance physique et sensible de la lumière.
- Chapitre 3 : le troisième chapitre a porté sur la connaissance et la caractérisation du processus de conception architecturale. Nous avons essayé d'identifier les phases ainsi que les activités qui caractérisent le processus cognitif de la conception architecturale. Ensuite nous avons parcouru le mode de participation et d'intégration de la lumière naturelle tout au long du processus de conception. Ce travail a donné lieu à une évaluation des besoins d'assistance à l'intégration de la lumière naturelle durant les phases conceptuelles du projet.
- Chapitre 4 : le quatrième chapitre propose une classification des méthodes et des outils d'assistance à la conception utilisés en architecture et particulièrement dans le domaine de la maîtrise des ambiances de lumière naturelle. La classification de ces méthodes et de ces outils s'est accompagnée d'un travail d'identification de leurs modes de participation aux activités et aux phases du processus de conception.
- Chapitre 5 : le dernier chapitre de cette partie propose une évaluation de l'utilisation des méthodes et des outils d'assistance à la conception dans la pratique de la conception architecturale à partir d'enquêtes réalisées avec des architectes, des chercheurs et des étudiants

suivant une formation en architecture. Ce chapitre dresse une liste de pistes pour le développement de nouvelles méthodes d'assistance à la conception.

La deuxième partie est structurée en deux chapitres :

- Chapitre 1 : Ce chapitre présente la structure et les activités de la méthode d'aide à la conception que nous proposons. Nous avons commencé par définir la phase de déclaration d'intentions faisant appel aux images références. Nous avons détaillé le mode de sélection et d'indexation de ces images afin qu'elles puissent représenter les intentions de conception d'effets de lumière naturelle. Ensuite nous avons défini les activités de la phase de génération et les différents paramètres à prendre en compte pour cette étape du processus d'assistance. Enfin, nous avons présenté la phase de prise de connaissance et les activités de parcours et d'évaluation des résultats de génération.
- Chapitre 2 : ce chapitre décrit l'implémentation de notre méthode d'assistance dans l'outil *DaylightGen* en définissant l'environnement logiciel utilisé pour son développement et en présentant ces différents composants. Nous avons détaillé le mode d'implémentation de la phase de déclaration des intentions et le choix de *Day@mbiance* comme support logiciel. Ensuite nous avons défini les composants de l'outil d'identification des intentions et de génération des solutions *DaylightBox* ainsi que son mode de fonctionnement. Enfin, ce chapitre est clôturé par la définition des composants logiciels et des fonctions de l'outil de visualisation, de navigation, de sélection et de personnalisation des solutions *DaylightViewer*.

La dernière partie est composée de deux chapitres :

- Chapitre 1 : ce chapitre décrit le protocole d'expérimentation mis en place pour évaluer le potentiel d'assistance de la méthode et de l'outil proposé. Nous avons ainsi déterminé le cadre pédagogique de cette expérimentation en précisant le profil des participants, le programme, le site et les contraintes du projet à concevoir. Enfin, la dernière partie de ce chapitre présente le processus de préparation et de déroulement de l'expérimentation.
- Chapitre 2 : ce chapitre présente la méthode d'analyse et les résultats des différentes sessions d'expérimentation. Nous avons défini deux types d'analyse : une première portant sur l'enregistrement des sessions de conception et une deuxième ayant comme objets d'étude les réponses des participants au questionnaire de retour d'expérience. Ce chapitre se conclut par la présentation des résultats de ces deux types d'analyse.

La conclusion générale de ce mémoire de recherche retrace les différentes étapes d'élaboration de ce travail de thèse, les résultats obtenus et les perspectives de développement futur que nous avons dégagé.

Partie A. Lumière et Architecture

Chapitre I. Lumière naturelle en architecture

Le Corbusier décrit l'architecture comme « *le jeu savant, correct et magnifique des volumes assemblés sous la lumière...* » (Corbusier, 1923). La lumière a toujours fasciné les architectes qui la considèrent comme génératrice et révélatrice de leurs œuvres. L'histoire de l'architecture retrace cet intérêt pour la lumière naturelle, un matériau que l'homme a su modeler de diverses manières et pour des objectifs variés. Le rapport entre la lumière naturelle et l'architecture a évolué en influençant les différents courants qui ont marqué l'histoire de la création architecturale. Les bâtisseurs et les architectes cherchaient à satisfaire et à trouver des solutions aux exigences liées à la maîtrise et au contrôle de la lumière naturelle. Des exigences, allant de la simple volonté d'apporter la quantité nécessaire de lumière naturelle pour éclairer un espace, à celle de mettre en valeur un aspect particulier ou un détail de l'espace à concevoir pour créer ainsi une ambiance lumineuse bien déterminée.

«Le choix d'une pièce carrée est aussi le choix de sa lumière, distinct d'autres formes et de leur lumière.» (Kahn, 2006).

Ce rapport d'influence donne une importance majeure à la lumière naturelle, considérée comme le matériau primaire pour toute conception architecturale. Ce chapitre permet de parcourir de manière synthétique et non exhaustive les évolutions du rapport entre lumière naturelle et architecture en faisant appel à un ensemble d'exemples et de références.

1. Lumière naturelle et architecture

La volonté de satisfaire le besoin de lumière a permis d'instaurer et de développer une adaptation et une influence mutuelle entre la lumière naturelle et l'architecture tout au long des époques qui ont marqué l'histoire de l'architecture occidentale. Cette influence a permis le développement des techniques de construction et particulièrement la structure et les ouvertures. Nous essayons tout au long de cette partie de retracer cette évolution en analysant un ensemble d'exemples de projets.

Les bâtisseurs de l'antiquité ont utilisé la dimension périodique de la lumière naturelle pour donner une valeur spirituelle et divine à leurs œuvres. Cette valeur s'exprime par l'emplacement des ouvertures qui sont calculées selon la position du soleil dans le ciel à des dates précises. Ce type de configuration de l'espace cherche à mettre en valeur un événement religieux par le biais d'un phénomène physique visuel. Cette mise en scène permet d'apporter une preuve de l'existence d'une force extérieure divine. L'architecture des temples religieux dédiés aux divinités de l'Égypte antique constitue un des exemples majeurs de ce type d'usage de la lumière qui oriente et modèle une architecture. Le grand temple d'Abou Simbel, taillé dans la pierre, possède une façade orientée dans la direction du soleil levant. Deux fois par an (le 20 février et le 20 octobre) cette lumière entre dans le temple par la porte principale et éclaire les statues de *Amon*, *Ramsès II* et *Ré* situées dans le sanctuaire apportant ainsi de la vie à ces divinités.

En Europe occidentale, l'architecture romane a fait évoluer le rapport entre architecture et lumière. La lumière devient le signe de l'existence d'une seule divinité. La présence de cette divinité est affirmée, au quotidien, par une lumière qui vient des parties supérieures des lieux de cultes. Cette lumière ponctuelle est générée par des ouvertures de taille très réduite créant un fort contraste et une pénombre permanente (Cf. Fig 1). L'architecture romane est une architecture massive et défensive. Elle est constituée de larges murs porteurs qui assurent la protection des bâtiments des nombreux attaques et conflits qui ont marqué cette période de l'histoire. Ce contexte technique et historique ne laisse pas la chance à l'architecture romane de s'ouvrir vers l'extérieur sans mettre en danger la stabilité et la pérennité même de ses édifices.



Fig 1. Eglise Saint-Etienne-Nevers (1063-1097)

L'architecture gothique a apporté une révolution structurelle qui a établi un premier pas vers l'ouverture de l'espace architectural, et plus particulièrement religieux, sur l'environnement extérieur. L'intégration de l'arc brisé et de l'arc-boutant a permis de libérer les murs de leur fonction porteuse rendant ainsi possible la création d'ouvertures plus larges et plus élancées (Cf. Fig 2). Ces dernières génèrent une nouvelle configuration lumineuse pour les espaces religieux gothiques structurée selon une lumière abondante en opposition totale avec l'aspect sombre de la période romane. L'utilisation des vitraux comme élément d'habillage de ces grandes ouvertures colore la lumière naturelle. C'est également un nouveau mode d'interpellation du regard du visiteur et une nouvelle représentation de la présence de la puissance divine. L'architecture gothique a créé une nouvelle notion dans le langage de la création architecturale à savoir : la transparence.



Fig 2. Vue intérieure et coupe de la Cathédrale d'Amiens (1220-1269)

«Au début, les murs étaient épais. Ils protégeaient l'homme. Celui-ci éprouva le désir de la liberté et de la promesse du monde extérieur. Il fit d'abord une ouverture grossière. Puis il expliqua au mur malheureux qu'en acceptant une ouverture, le mur devait se conformer à un ordre plus haut avec, pour nouveaux éléments de valeur, des arcs et des pilastres. Ce sont là des réalisations de l'architecture de la Lumière et de la Structure.» (Kahn, 2006).

L'architecture industrielle du XIXe siècle, à la différence de celle de la renaissance, du baroque, du rococo et du néoclassique, a établi une nouvelle relation avec la lumière naturelle. Elle considère la transparence comme un symbole de modernité et d'émancipation des contraintes matérielles et

physiques qui ont marqué les mouvements précédents de l'histoire de l'architecture. La révolution industrielle a fait de l'acier et du verre les principaux matériaux de construction. Ces matériaux ont créé de nouveaux rapports entre les couples architecture-matière et architecture-lumière. Le Crystal Palace, conçu par *Joseph Paxton* pour la première exposition universelle de 1851 à Londres a marqué cette époque (Cf. Fig 3). Il a dématérialisé l'architecture en mettant en œuvre les nouvelles technologies de transformation de l'acier et du verre à une échelle industrielle pour proposer de nouveaux principes constructifs. Ainsi, les poteaux métalliques porteurs de la structure créent des vides couverts par des parois de verre. Cette architecture légère a donné naissance à une nouvelle lumière omnidirectionnelle et globale qui couvre la totalité de l'espace intérieur. Ce mode constructif et cette lumière ont fait l'identité des halls d'expositions (dont le Grand Palais à Paris), des serres botaniques, des ateliers et des gares de l'époque.



Fig 3. Le Crystal Palace (1850-1854)

La notion de transparence a intégré l'espace domestique avec l'arrivée du béton. Cet événement a accompagné les mouvements modernes de démocratisation et d'internationalisation de l'architecture qui ont suivi la Première Guerre mondiale. Le Corbusier et Gropius sont parmi les architectes de l'époque qui ont lancé le mouvement de rationalisation de l'architecture. Leur objectif est de rendre l'espace plus fonctionnel afin de répondre aux nouvelles règles sanitaires, sociales et urbaines. Le béton a accompagné ce processus en offrant un temps de réalisation et d'exécution rapide et systématique. Il a participé à la création d'un nouveau principe structurel qui dissocie la structure de la paroi et crée des surfaces totalement transparentes et vitrées (Mestelan, 2005). L'architecture moderne est à l'origine d'une lumière rationnelle qui répond à un besoin d'éclairage pour une activité précise.

Chaque espace dispose d'une lumière particulière selon la fonction qu'il accueille. Les surfaces totalement vitrées des ateliers du Bauhaus créent une continuité entre l'environnement extérieur et l'espace intérieur reproduisant ainsi les mêmes conditions d'éclairage. *Ludwig Mies Van der Rohe* a exposé ces principes de l'enveloppe transparente à travers le Pavillon d'Allemagne réalisé pour l'exposition universelle de Barcelone en 1929. Ses intentions et ses dessins ont pu se matérialiser avec l'évolution des techniques de fabrication des panneaux de verre et des châssis en acier. Ces derniers ont remplacé le mur et sa massivité par des surfaces vitrées totalement transparentes et légères générant une continuité d'éclairage entre l'espace intérieur et l'environnement extérieur (Cf. Fig 4).



Fig 4. Pavillon de Barcelone (1929)

Le mouvement international a développé les principes structurels de la période moderne donnant naissance à une architecture de tours de grande hauteur tout en gardant une forme régulière et orthogonale dissociée du mouvement du soleil. Cette architecture a libéré totalement les enveloppes extérieures à travers la mise en place de la technologie du mur-rideau. Le traitement en mur-rideau de l'enveloppe extérieure des édifices assure une transparence totale des façades. La grande largeur de ces édifices crée un éclairage périphérique des espaces intérieurs, laissant le reste sous le règne de l'éclairage artificiel.

L'architecture contemporaine a développé le principe de légèreté des techniques constructives et particulièrement celle de la fabrication et du montage des panneaux de verres défiant ainsi les lois de la physique pour atteindre le niveau de transparence totale. Cette transparence a donné une valeur symbolique à des édifices tels que le Cube de l'Apple Store de New York conçu par Peter Bohin (Cf. Fig 5). Ce bâtiment de forme cubique totalement transparente est construit à partir d'un assemblage de panneaux de verres continus et sans séparation porté par une structure légère (en verre) située à

l'intérieur de l'édifice. Le cube de verre constitue un symbole d'innovation technologique que la société Apple a utilisé pour affirmer son potentiel d'innovation. Cet édifice crée une continuité visuelle totale entre l'intérieur et l'environnement extérieur assurant les mêmes conditions d'éclairage.



Fig 5. Apple Store de New York

L'architecture contemporaine a également remis en questions certains principes de l'architecture du mouvement international. C'est le résultat d'une prise de conscience de l'incompatibilité de ces principes avec la réalité physique liée aux problèmes de surchauffe et de consommation énergétique. Ce constat a donné lieu à une transparence contextualisée qui prend en compte l'environnement physique et social de situation du projet d'architecture. L'adaptation au contexte climatique et environnemental associée au développement des techniques de construction est à l'origine d'un nouveau langage formel plus organique tel que celui du Kunsthaus (Cf. Fig 6), en opposition avec la rigidité et la régularité formelle de l'architecture moderne. Il s'agit d'une architecture non statique en phase avec le mouvement qui caractérise l'environnement naturel. Le but est de chercher à maîtriser et à optimiser la captation et la distribution des apports solaires pour répondre à un besoin d'éclairage fonctionnel et sensible.



Fig 6. Kunsthaus-Graz (2001-2002)

2. Lumière naturelle et architecte

La lumière naturelle est considérée par les architectes comme un outil d'expression architecturale qui participe au processus de genèse et de qualification de l'espace physique en lui attribuant une dimension sensible comme le décrit Le Corbusier : *«J'use, vous vous en êtes douté, abondamment de la lumière. La lumière est pour moi l'assiette fondamentale de l'architecture. Je compose avec la lumière»* (Corbusier, 1930). Cette expression peut avoir plusieurs formes et plusieurs objectifs que nous essayons d'identifier à partir de l'analyse de textes et de productions d'architectes contemporains

La lumière naturelle est l'un des matériaux principaux permettant aux architectes de définir et de matérialiser la dimension sensible de leurs projets. L'objectif est de dépasser le simple aspect matériel et fonctionnel du projet pour lui attribuer une signification et une légitimité architecturale. La manipulation et le modelage de la lumière naturelle comme matériau sont des moyens d'exprimer, de représenter et de matérialiser les intentions des architectes. Elle révèle ses intentions et les met en forme à travers sa manière d'occuper l'espace architectural.

« Dans un bâtiment, j'aime la lumière, la pénombre et même l'obscurité. Ce sont des choses en rapport, complémentaires. Dans un pays du Sud, cette idée de profondeur, de variation et de contrôle de la lumière est très importante. On a toujours dans la mémoire l'exemple de l'Alhambra de Grenade où l'on est envahi par la lumière et le soleil dans le jardin, et on entre dans un espace et on passe dans un patio qui protège qui donne l'ombre et on entre dans une loggia où la lumière est moins intense et on passe dans une autre chambre où déjà il y a la pénombre et on va jusqu'à la sérénité

totale. Ce sont des dimensions de l'architecture que l'on ne peut pas perdre. Que l'on doit utiliser.» (Siza, 2001)

Une intention architecturale peut porter sur la mise en évidence d'une partie du projet ayant une certaine valeur symbolique pour l'occupant ou pour le concepteur. Il s'agit d'un besoin de matérialisation d'une idée qui peut se concrétiser par la concentration de la lumière sur un objet ou sur une partie du projet qui attribue une signification majeure à l'œuvre architecturale. Cette mise en valeur peut être concrétisée par la création d'un contraste entre les différentes zones du projet. (Cf. Fig 7). La lumière naturelle joue un rôle dans l'affirmation et la caractérisation de la fonction d'un espace architectural. Ainsi, la dimension spirituelle et divine d'un espace de recueillement peut être matérialisée par une atmosphère sombre percée par un rayon lumineux incident. Un contraste entre la pénombre qui occupe l'espace et la présence d'une lumière intense isolant l'occupant du monde extérieur tout en gardant une preuve de son existence. Ce contraste fait référence à la dualité qui existe entre le monde profane et le monde divin attribuant à la lumière naturelle une fonction révélatrice de la dimension spirituelle que peut avoir l'espace architectural.



Fig 7. Mise en valeur d'un élément architectural, La Maison Hakuei-Akira Sakamoto/Mise en valeur de la fonction d'un espace, Church of light-Tadao Ando [(Cerver, 2005) / (Jodidio, 2012)]

«C'est donc particulièrement, l'organisation quasi scénographique des jeux d'ombres et de lumière qui est la clé de cette composition subtile des volumes intérieurs et est génératrice de l'atmosphère de recueillement et de mystère régnant dans l'édifice sacré.» (Pauly, 1980).

La lumière naturelle est un outil de matérialisation de la volonté du concepteur d'instaurer une continuité entre le projet architectural et l'environnement qui l'entoure. Cette continuité se formalise à travers le transfert des conditions d'éclairage extérieures vers l'intérieur du projet sans subir de transformation. La création d'une lumière directe de forte intensité sans subir de transformation de couleur et de direction supprime les barrières physiques qui séparent l'espace architectural du milieu extérieur et crée la continuité recherchée par le concepteur

La lumière naturelle donne une identité visuelle à l'espace le différenciant des autres, une identité qui suggère la fonction et le public qu'il est sensé accueillir (Cf. Fig 8). Un espace clair couvert d'une lumière régulière, uniformément répartie, crée des conditions d'éclairage favorables à une activité professionnelle. Par contre, un espace obscur tranché par un rayon de soleil générant un apport lumineux contrasté est un espace accueillant une fonction de recueillement et de méditation. Cette identification prend en compte la dimension temporelle de la lumière naturelle où l'espace architectural est animé par le mouvement du soleil et les variations d'éclairements qui en découlent créant ainsi une dynamique architecturale et spatiale.

«Même une pièce qui doit être obscure, a besoin au moins d'une petite fente pour qu'on se rende compte de son obscurité. Mais les architectes qui aujourd'hui dessinent les pièces ont oublié leur foi en la lumière naturelle. Assujettis à la facilité d'un interrupteur, ils se contentent d'une lumière statique et oublient les qualités infinies de la lumière naturelle grâce à laquelle une pièce est différente à chaque seconde de la journée.»(Kahn, 2006).



Fig 8. 3 espaces / 3 identités différentes [site officiel de Campo Baeza (Jodidio, 2012)/(Cerver, 2005)]

Outre la fonction de mise en valeur et d'identification de la fonction d'un espace architectural, la lumière naturelle peut avoir une fonction révélatrice des caractéristiques des matériaux qui le compose. L'aspect lisse ou rugueux de matériaux composant une surface peut être révélé par une lumière directe de forte intensité avec une direction tranchante. La perception de la couleur d'un matériau est largement influencée par la couleur, l'intensité et la direction des rayons solaires incidents. Ainsi, une lumière indirecte et diffuse peut dissimuler la réalité des matériaux. Cette lumière fusionne les matériaux pour créer une substance éthérée générant une unité et une homogénéité ambiante dans l'espace intérieur des pièces (Reiter, De Herde, 2004) (Cf. Fig 9).



Fig 9. Une lumière qui révèle les matériaux (droite)/Une lumière qui dissipe les matériaux (gauche)/[(Schittich, 2002)/ ©J.C Bignon]

La lumière naturelle crée une relation de dépendance et d'influence mutuelle avec la structure de l'espace architectural. Louis Kahn décrit la structure comme étant « *le donneur de lumière. Un ordre de structure qui implique la présence d'une autre colonne à côté d'une colonne offre un rythme de non-lumière, lumière, non-lumière, lumière, non-lumière. Une voûte, un dôme sont un choix du caractère de lumière* » (Kahn, 2006). La structure apparaît dans ce cas comme une non-lumière et la lumière comme une matière qui remplit le vide qui sépare les unités structurelles créant une complémentarité entre une entité matérielle et une autre immatérielle. D'un côté, la structure peut être considérée alors comme l'élément qui formalise et modèle la lumière incidente et un support physique de la lumière naturelle. De l'autre côté, la lumière naturelle est une matière dense et presque solide portée et matérialisée par la structure (Reiter, De Herde, 2004).

La lumière naturelle peut être révélatrice des aspects intrinsèques de la structure d'un bâtiment, en mettant en évidence des détails d'assemblage ou de composition. Elle peut avoir aussi une fonction dissimulatrice rendant ainsi la structure flottante, immatérielle ou même complètement absente (Cf. Fig 10).

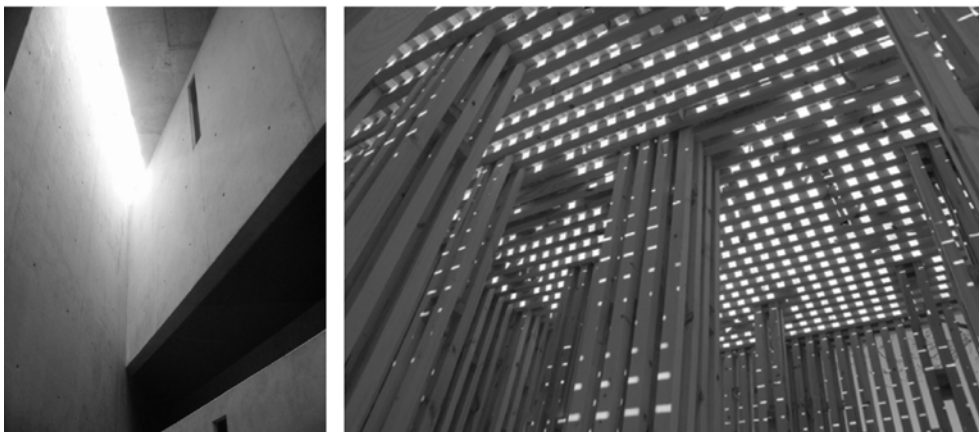


Fig 10. Lumière qui dissimule/révèle la structure [(Barreneche, 2005)/Site officiel du département d'architecture-université technologique d'Helsinki-wood program]

3. Synthèse

Nous avons essayé d'établir, au cours de cette première partie, une lecture générale des rapports qui relient la lumière naturelle et l'architecture. Nous avons commencé par retracer le rôle et les implications de la lumière naturelle dans les évolutions majeures qui ont marqué l'histoire de l'architecture. Nous avons identifié les fonctions de la lumière naturelle dans le cadre architectural. Des fonctions qui portent sur l'éclairage, l'identification et la révélation des propriétés intrinsèques des espaces. La détermination de ces fonctions fait appel aux propriétés de quantification des apports solaires et de qualification de leur propagation dans l'espace architectural.

Pour mieux comprendre et maîtriser le comportement de la lumière naturelle, nous essayons tout au long du chapitre suivant d'appréhender la lumière naturelle selon son aspect physique et sensible. Le premier aspect portera sur l'origine de la lumière naturelle, son parcours et enfin sa rencontre avec le milieu naturel et architectural. Le deuxième aspect sensible s'intéressera à la qualification des effets de lumière naturelle à travers des exemples dans le domaine de la peinture, du cinéma et de l'architecture.

Chapitre II. La lumière naturelle : phénomène physique et sensible

Le comportement lumineux d'un espace architectural est le résultat d'une interaction entre la lumière naturelle, comme phénomène physique éphémère, et l'espace architectural comme phénomène matériel permanent. Nous commençons ce chapitre par chercher à définir les paramètres qui régissent ce rapport en commençant par identifier les caractéristiques de la lumière naturelle comme phénomène physique. Il sera question de définir les mécanismes de perception de la lumière naturelle et particulièrement la notion de couleur. Nous chercherons à identifier les grandeurs physiques permettant de mesurer et quantifier la lumière naturelle. Ensuite il sera question de caractériser la dimension architecturale de la lumière naturelle. Nous chercherons à mesurer le poids des composants de l'espace architectural dans la captation et la répartition des apports solaires.

Ensuite, nous essaierons de caractériser la lumière sous son aspect sensible et perceptible à travers l'analyse de scènes d'éclairage d'œuvres picturales, cinématographiques et architecturales. Enfin, la dernière partie ce chapitre cherchera à croiser les phénomènes physique et sensible de la lumière naturelle et d'identifier les points de correspondance entre ces deux domaines d'étude.

1. La dimension physique de la lumière naturelle

1.1 Caractérisation physique

La lumière est caractérisée par deux aspects physiques dont la définition et la description ont évolué au cours de l'histoire des sciences. Un premier aspect ondulatoire décrit la lumière comme une onde électromagnétique à oscillation sinusoïdale d'une longueur d'onde (λ) et période (T) et une fréquence (ν). Un deuxième aspect corpusculaire décompose la lumière en grains d'énergies appelées photon résultant du mouvement des électrons de couches électroniques de niveau d'énergie élevé vers d'autres couches de niveau d'énergie faible (Cf. Fig 11). La lumière constitue la partie visible du spectre électromagnétique couvrant les ondes magnétiques d'une longueur d'onde allant de 380 nm jusqu'à 700 nm. La réfraction de la lumière blanche par un prisme permet ainsi de visualiser ses différentes radiations. Celles-ci sont colorées et s'étalent du violet (380 nm) au rouge (700 nm) en passant respectivement par l'indigo, le bleu, le vert, le jaune et l'orange constituant les couleurs de l'arc-en-ciel (Cf. Fig 11) (Reiter, De Herde, 2004).

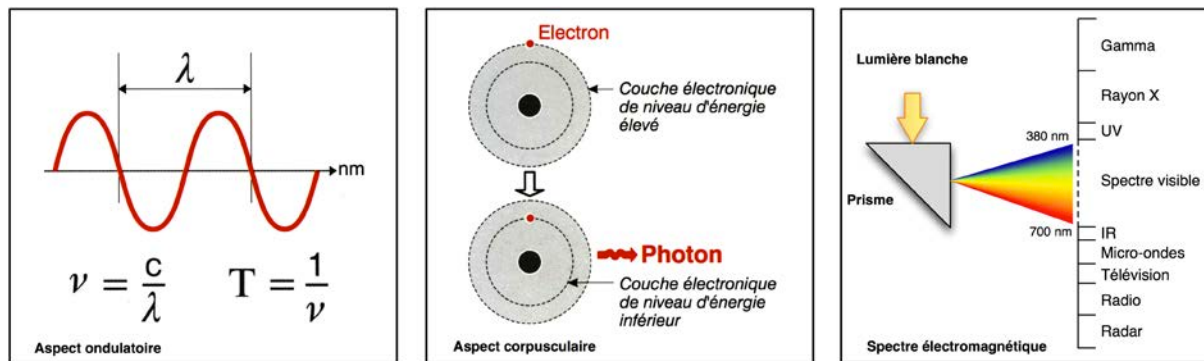


Fig 11. Aspects ondulatoire et corpusculaire de la lumière (Reiter, De Herde, 2004) / Propriétés du spectre visible de la lumière naturelle

1.2 Les sources de lumière

Le soleil comme la bougie ou l'ampoule incandescente sont des sources de lumière thermiques qui produisent la lumière grâce à des corps chauds avec des températures variables. Cette différence est visible au niveau des courbes décrivant la densité spectrale des rayonnements. Le soleil présente une forte densité spectrale avec une grande partie de l'énergie produite localisée dans la zone visible du spectre qui crée une lumière blanche. Par contre, une source artificielle à faible température comme une ampoule possède une faible densité spectrale. Elle génère ainsi une énergie située dans la zone des infra-rouges avec une partie visible du spectre qui a plus de lumière rouge que de bleu. La correspondance entre la notion de température et celle de couleur de lumière permet de créer le concept de « température de couleur ». Il s'agit d'un phénomène paradoxal, car les lumières qualifiées de « chaudes » ayant une teinte rouge sont obtenues à partir de corps à température basse alors que les lumières dites « froides » ont une teinte bleue et sont obtenues à des températures élevées.

Il existe d'autres sources de lumière artificielle qui permettent de créer de la lumière mettant en œuvre un gaz (néon, vapeur de mercure) traversé par une décharge électrique. Ces sources à base de vapeur de mercure créent des rayonnements ultra-violet invisibles qui sont ensuite convertis en lumière blanche grâce à des revêtements fluorescents. Ces sources froides de lumière artificielle produisent des spectres fragmentés à paliers à la différence de ceux des sources thermiques qui présentent des courbes continues et lisses. L'utilisation de plusieurs composants fluorescents pour les sources à base de vapeur de mercure permet d'aboutir à une quasi-continuité du spectre lumineux ce qui n'est pas le cas pour les sources à base de gaz néon (Cf. Fig 12) (Baker, K. A. Steemers, 2002).

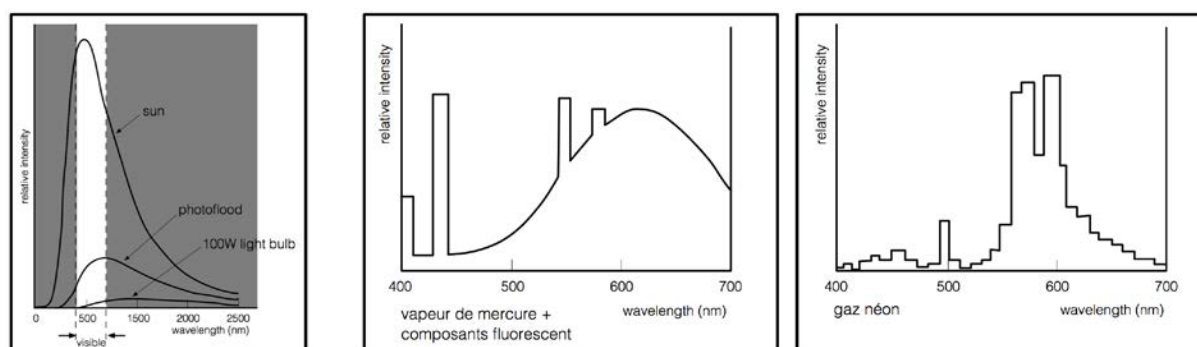


Fig 12. Spectres lumineux de sources électriques / Spectres lumineux d'une source thermique (Baker, K. A. Steemers, 2002)

1.3 Lumière et surface

La lumière naturelle peut se comporter de trois manières différentes au contact des surfaces d'objets physiques. Elle peut tout d'abord être réfléchie au contact d'une surface opaque. Le facteur de réflexion (R), défini comme étant le ratio de l'énergie réfléchie par rapport à l'énergie incidente, quantifie ce comportement. La lumière peut être aussi transmise si elle est au contact d'une surface transparente. Le facteur de transmission (T) égal au ratio de l'énergie transmise par rapport à l'énergie incidente caractérise ce comportement. Finalement, la lumière peut être absorbée par les surfaces de contact, qu'elles soient transparentes ou bien opaques. Le facteur d'absorption de la lumière (a) est défini comme étant le ratio de l'énergie absorbée par rapport à l'énergie incidente. Les propriétés de réflexion (R), d'absorption (a) et de transmission (T) peuvent s'associer en totalité pour un matériau transparent ($R+T+a=1$) ou bien en partie pour un matériau opaque ($R+T+a=1$ avec $T=0$) (Cf. Fig 13).

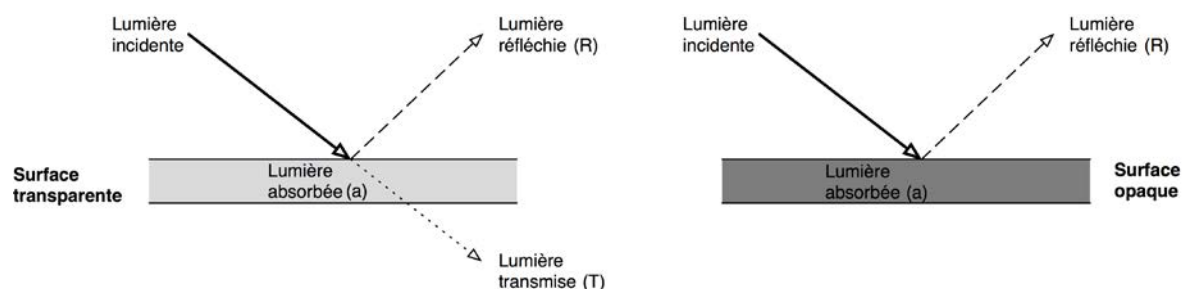


Fig 13. Comportement de la lumière au contact des surfaces de matériau transparent ou opaque

La réflexion est spéculaire dans le cas où la lumière se réfléchit dans une seule direction avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Elle est diffuse parfaite dans le cas où elle se réfléchit dans plusieurs directions et de manière homogène. Enfin, elle est diffuse quelconque dans le cas où la diffusion se fait de manière aléatoire. La réflexion mixte associe le mode spéculaire et le mode diffus cas où la lumière se réfléchit de manière diffuse tout en privilégiant une direction précise. Ces modes s'appliquent de la même manière à la transmission de la lumière et avec les mêmes propriétés caractéristiques (Cf. Fig 14).

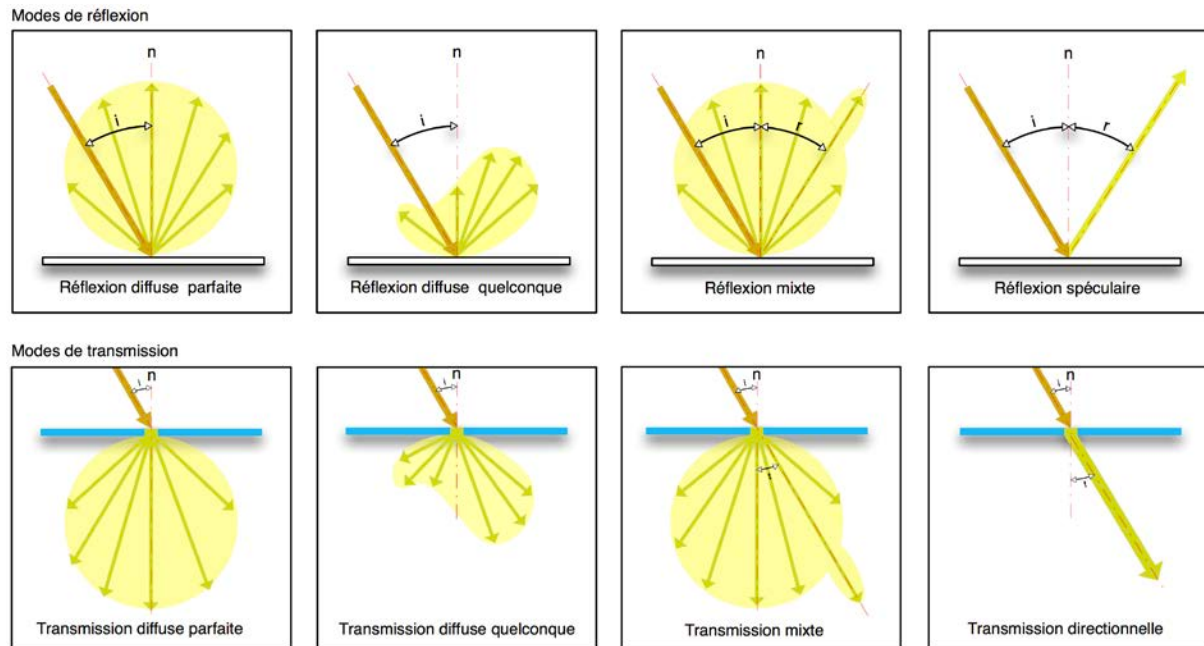


Fig 14. Différents modes de réflexion et de transmission de la lumière (Reiter, De Herde, 2004)

Ces modes de diffusion et de réflexion de la lumière permettent d'identifier quatre types de surfaces d'objets physiques :

- Les surfaces spéculaires, lisses et parfaitement réfléchissantes.
- Les surfaces brillantes, lisses et partiellement réfléchissantes.
- Les surfaces mates, parfaitement diffusantes.
- Les surfaces satinées dont le comportement correspond à celui des surfaces mates ou brillantes selon l'angle d'incidence des rayons lumineux. Si l'angle d'incidence est rasant, ce type de surface agit comme une surface réfléchissante, alors que si l'angle d'incidence diminue celle-ci se comporte comme une surface mate.

1.4 Lumière et couleur

L'analyse du spectre visible des rayonnements lumineux dégage trois couleurs primaires : le bleu, le rouge et le vert. La synthèse additive de ces trois couleurs, à des proportions bien déterminées, génère toutes les autres couleurs. En revanche, les trois couleurs primaires de matière sont le jaune, le cyan et le magenta ; le mélange de ces derniers permet d'avoir les autres couleurs. Au contact de la lumière, la matière réfléchit une partie de la lumière incidente et absorbe le reste. La partie absorbée de la lumière est celle qui a la même couleur que les pigments de la matière. Ce principe constitue synthèse soustractive des couleurs. (Cf. Fig 15).

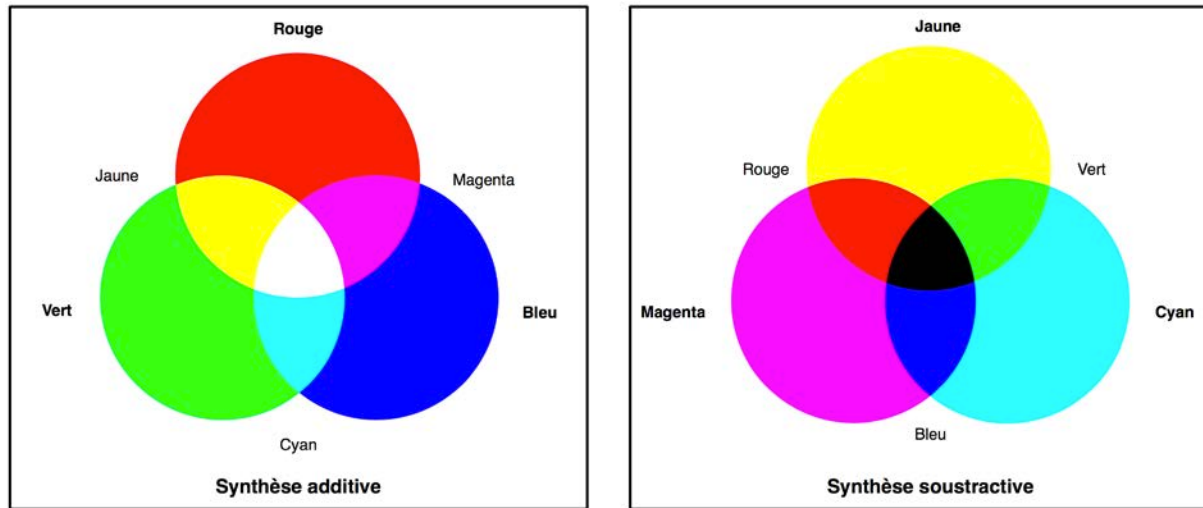


Fig 15. Synthèse additive / Synthèse soustractive

La perception de la couleur d'un objet physique est définie par la couleur de la lumière qui l'éclaire et qui le rend visible. Elle fait appel à l'ensemble des paramètres qui caractérisent la lumière naturelle, dont l'absorption, la réflexion et la transmission. La couleur perceptible est déterminée par l'absorption d'une part du spectre visible de la lumière incidente par les pigments de l'objet éclairé. Ce principe est valable pour les objets transparents ou opaques. Pour un objet composé de deux couches transparentes teintées respectivement en cyan et en jaune, la première couche absorbera la couleur rouge de la lumière blanche incidente et transmettra les rayonnements de couleurs bleues et vertes. La deuxième couche, de couleur jaune, transmettra les rayonnements de couleurs rouges et vertes et absorbera le bleu. Au final, seule la couleur verte sera transmise aboutissant à une lumière de couleur verte. La définition de la couleur d'un objet opaque fait appel aux mêmes principes. Une surface opaque de teinte rouge éclairée par une lumière de couleur blanche absorbera toutes les autres couleurs et réfléchira la couleur rouge. Ainsi, l'objet aura finalement une teinte rouge (Cf. Fig 16) (Baker, K. A. Steemers, 2002).

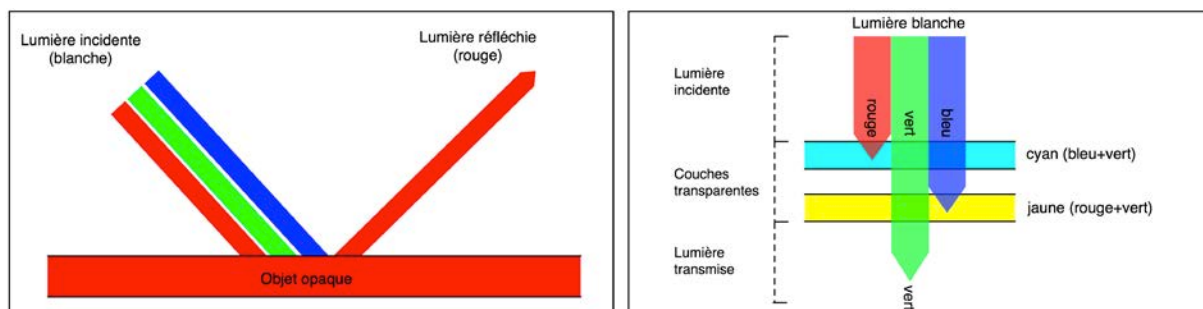


Fig 16. Définition de la couleur d'un objet opaque / d'un objet transparent

1.5 La quantification et la mesure de la lumière

Nous essayons dans cette partie de suivre le cheminement du rayonnement solaire de la source (le soleil) vers la cible (l'homme). Ce cheminement sera caractérisé en faisant appel aux grandeurs photométriques qui dérivent le parcours des rayonnements solaires. Nous commençons par identifier les propriétés des sources d'éclairage. Ensuite, il sera question de caractériser le mode de propagation de cette énergie et sa rencontre avec le milieu naturel et bâti. Enfin, notre attention portera sur la détermination du rapport entre la lumière incidente et la perception humaine (Cf. Fig 17).

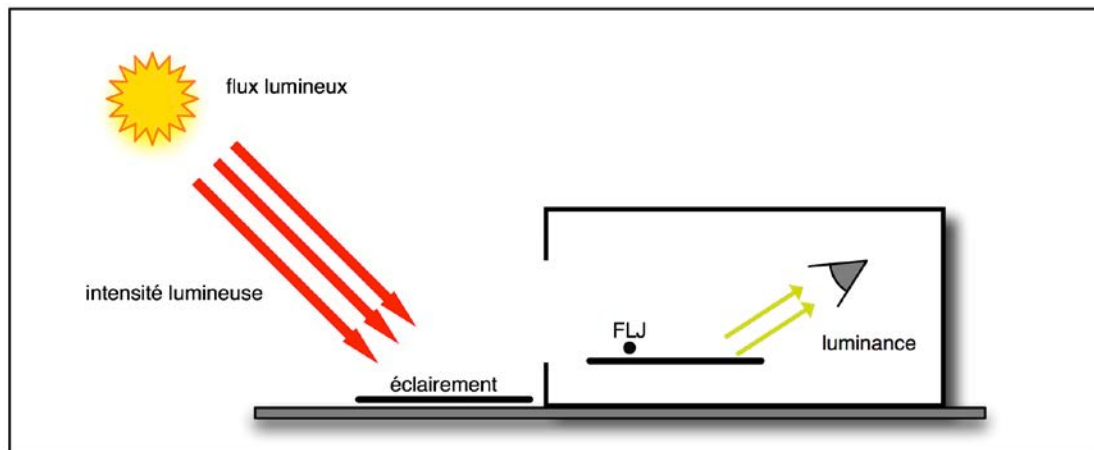


Fig 17. Types de grandeurs photométriques

1.5.a Le flux lumineux

Le flux lumineux (Φ) exprimé en Lumen (lm), est la puissance énergétique émise par une source sous sa forme visible (Cf. Fig 18). Il correspond au rayonnement prenant en compte la sensibilité de l'œil humain et ayant une longueur d'onde comprise dans le domaine visible (380 -700 nm). Le flux lumineux d'une source est calculé en fonction du flux énergétique émis par la source et de la sensibilité de l'œil pour chacune des longueurs d'ondes du domaine visible.

$$\Phi = 683 \cdot \int_{380nm}^{700nm} S(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

$S(\lambda)$ est la répartition spectrale lumineuse correspondant à l'énergie émise pour chacune des longueurs d'onde du domaine visible. $V(\lambda)$ est la sensibilité spectrale relative à l'œil humain. La valeur 683 lm/W correspond à la valeur maximale de sensibilité de l'œil pour un rayonnement monochromatique (Reiter, De Herde, 2004).

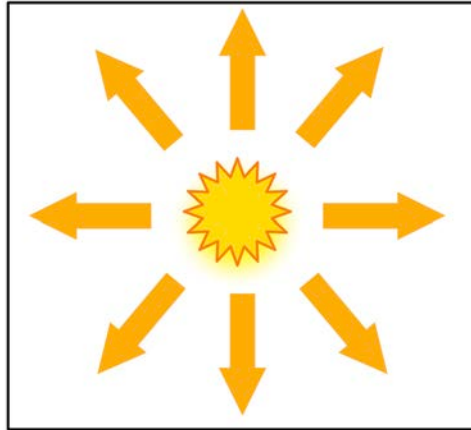


Fig 18. Flux lumineux

1.5.b L'efficacité lumineuse

Ce paramètre est décrit comme étant le rapport entre le flux lumineux (Φ) d'une source et sa puissance énergétique (P). La puissance énergétique correspond au flux énergétique pour les sources naturelles et à l'énergie électrique consommée pour les sources artificielles.

$$\eta = \Phi / P \text{ (lm/W)}$$

1.5.c L'intensité lumineuse

L'intensité lumineuse (I) correspond au flux lumineux (Φ) émis par unité d'angle solide (Ω) dans une direction donnée (Cf. Fig 19). L'unité de mesure de l'intensité lumineuse est le candela (cd).

$$I = \Phi / \Omega$$

« L'angle solide (Ω) d'un cône est le rapport de la surface (S) découpée sur une surface sphérique (ayant son centre au sommet de ce cône) au carré du rayon de la sphère (r). Il s'exprime en stéradians (sr). » (Reiter, De Herde, 2004)

$$\Omega = S / r^2$$

Le stéradian est l'angle solide qui découpe une surface, d'une aire égale r^2 , d'une sphère de rayon (r). L'angle solide maximal est à 4π . L'intensité lumineuse d'une valeur de 1 candela est égale au flux lumineux de 1 lumen rayonné dans un angle solide de 1 stéradian.

$$1 \text{ candela} = 1 \text{ lumen} / 1 \text{ stéradian}$$

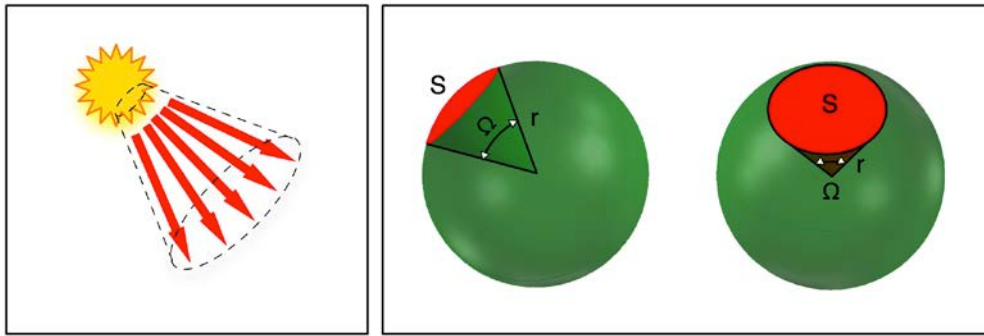


Fig 19. Intensité lumineuse / angle solide

1.5.d L'éclairement

L'éclairement lumineux correspond au flux lumineux (Φ) reçu par unité de surface (S). Il est exprimé en lux (lx). 1 lux équivalent à un flux lumineux de 1 lumen (lm) couvrant uniformément une surface de 1 mètre carré (Cf. Fig 20).

$$E = \Phi / S \text{ avec } 1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / \text{m}^2$$

Il existe une relation qui relie la notion de l'éclairement E (lx) à celle de l'intensité lumineuse I (cd) où l'éclairement est égal au rapport entre l'intensité lumineuse et la distance au carré entre la source et la surface à éclairer (d^2).

$$E = I / d^2$$

Cette formule fait intervenir l'angle d'inclinaison (α) entre la direction de la source et la surface éclairée quand ces deux éléments ne sont pas perpendiculaires (Cf. Fig 20).

$$E = (I / d^2) \cos \alpha$$

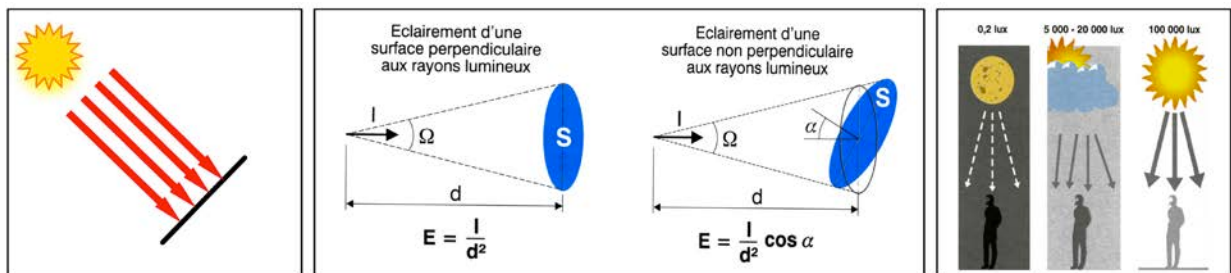


Fig 20. Eclairement lumineux / Rapport éclairement-intensité lumineuse / Exemples de niveaux d'éclairéments

Ce type de paramètre permet au concepteur de mesurer la quantité de lumière disponible à l'intérieur d'un espace architectural. Les valeurs d'éclairéments constituent une référence utilisée par les architectes pour adapter leurs propositions architecturales et d'atteindre des objectifs d'éclairement bien définis.

1.5.e La luminance

La luminance est définie comme étant le rapport entre l'intensité lumineuse émise par une source lumineuse dans une direction donnée et la surface apparente de cette source dans la même direction. Elle traduit la sensation visuelle suggérée par une source de lumière principale (soleil) ou secondaire (surfaces éclairées) (Reiter, De Herde, 2004). Ce paramètre permet au concepteur d'évaluer l'aspect visible de la lumière qui éclaire l'espace architectural et son niveau d'éblouissement l'aidant ainsi à atteindre ses objectifs en terme de qualité de lumière.

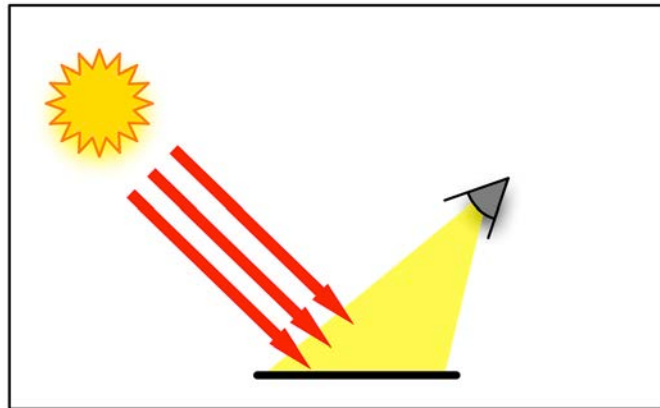


Fig 21. La luminance des surfaces éclairées

1.5.f Facteur lumière du jour

A la différence des autres grandeurs photométriques, le facteur de lumière du jour (FLJ), est uniquement utilisé pour qualifier l'éclairage naturel en milieu architectural. Il correspond au rapport entre l'éclairement naturel obtenu à l'intérieur d'un espace architectural mesuré au niveau du plan de travail et le niveau d'éclairement de l'environnement extérieur mesuré sur une surface horizontale parfaitement dégagée ($FLJ = E_{\text{intérieur}} / E_{\text{extérieur}}$). Ces deux niveaux d'éclairement sont calculés dans des conditions de ciel couvert diffusant une lumière homogène. Les valeurs de facteur de lumière du jour s'expriment en pourcentage (%) (Reiter, De Herde, 2004) (Cf. Fig 22).

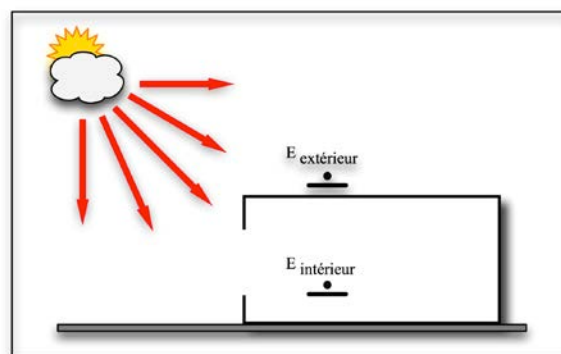


Fig 22. Mode de calcul du FLJ

Le facteur de lumière du jour est mesuré sous des conditions de ciel couvert qui le rendent indépendant de la variation de l'orientation des ouvertures, de la saison ou des heures de la journée. Cette neutralité permet au facteur de lumière du jour d'être considéré comme étant une référence rendant la comparaison du comportement lumineux de différentes configurations architecturales moins complexe. La comparaison portera sur la position et la taille des ouvertures apportant une aide objective dans une démarche de conception.

1.5.g Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire décrit l'énergie solaire reçue par une surface pour une durée déterminée. Ce rayonnement est défini par la puissance de l'irradiation solaire estimée à 63500 W/m^2 dont 1370 W/m^2 atteint les limites de l'atmosphère terrestre constituant la constante solaire. Comme les autres sources de lumière, le soleil émet un rayonnement à différentes longueurs d'onde composant ainsi le spectre solaire (Cf. Fig 23).

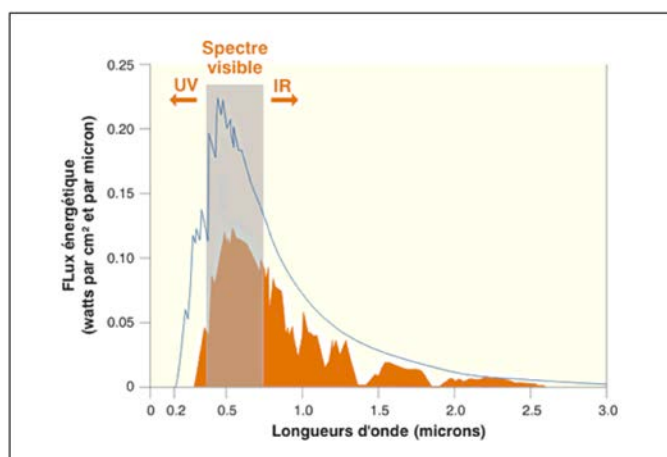


Fig 23. Spectre solaire (Architecture et Climat, 2012)

D'après le spectre solaire, le rayonnement lumineux constitue 46% de l'énergie totale du soleil alors que 55% de cette énergie se situe dans la zone Infra Rouge (IR) porteurs de l'apport thermique du soleil. Le reste du rayonnement se situe dans la zone des Ultra Violet (UV).

L'atmosphère réfléchit une partie des rayonnements solaires qu'il reçoit vers l'espace. Le reste du rayonnement est absorbé et diffusé par les couches de l'atmosphère pour atteindre la surface de la terre avec une valeur maximale estimée à 1000 W/m^2 . L'épaisseur de l'atmosphère intervient dans la détermination de la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre. Les rayons de soleil ont moins de distance à parcourir pour atteindre la surface de la terre quand le soleil est haut. Le rayonnement solaire gardant ainsi sa puissance en réduisant les pertes dues aux phénomènes d'absorption et de diffusion. Par contre, au lever et au coucher, le soleil est plus bas augmentant ainsi la distance de passage de l'atmosphère. Cette distance réduit la puissance des rayons incidents en absorbant et en diffusant l'énergie qu'ils transportent (Cf. Fig 24).

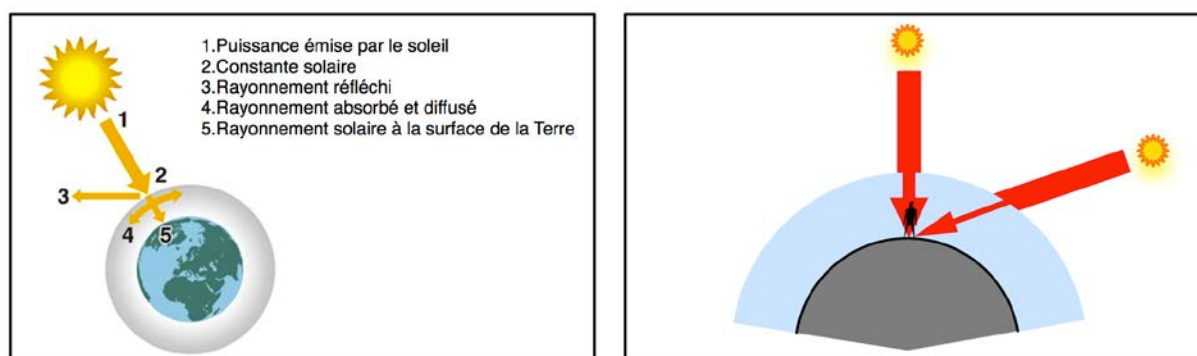


Fig 24. Parcours du rayonnement solaire à travers l'espace (Architecture et Climat, 2012) / l'atmosphère

Le rayonnement solaire varie aussi en fonction de la position de la terre par rapport au soleil concrétisé par les solstices et les équinoxes. Ils définissent des angles d'exposition et des temps d'ensoleillement différents variant ainsi la quantité de rayonnement solaire sur la surface de la terre.

La position du soleil est l'un des paramètres déterminants de la quantité d'apports solaire sur une surface. La connaissance de sa position permet de prévoir la direction des rayonnements et l'apport énergétique qu'ils apportent à une surface d'un bâtiment. Cette position est décrite par les notions de hauteur et d'azimut du soleil. La hauteur du soleil est définie comme étant l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal alors que l'azimut représente l'angle que fait le plan vertical passant à la fois par le soleil et le lieu considéré et le plan vertical Nord-Sud (Cf. Fig 25).

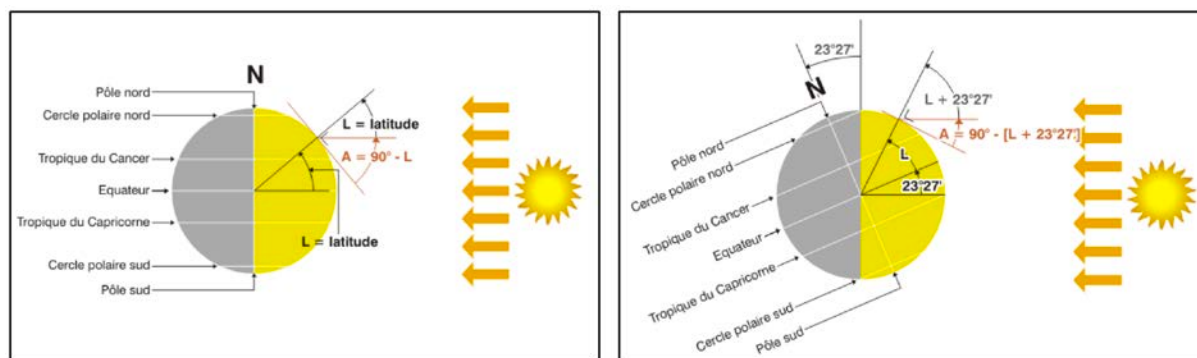


Fig 25. Equinoxes printemps et automne/solstice d'été (Architecture et Climat, 2012)

La position du soleil et le temps d'ensoleillement changent d'un lieu à un autre créant ainsi une variation des apports solaires d'un point géographique à un autre. Cette variation est plus importante entre les localisations de latitudes différentes (Cf. Fig 26).

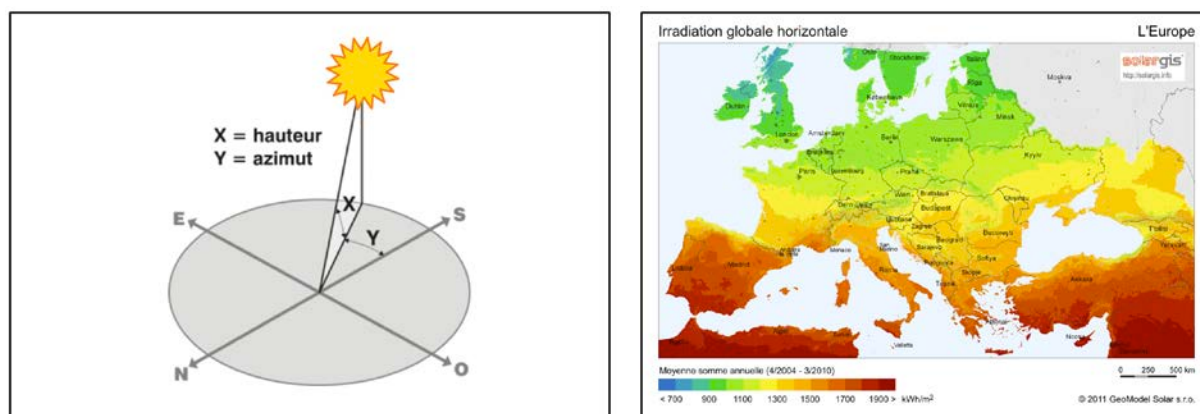


Fig 26. Azimut et hauteur du soleil (Architecture et Climat, 2012) / Variation des moyennes annuelles d'apport solaire [SolarGIS © 2012 GeoModel Solar]

Outre la position du soleil, le rayonnement solaire est influencé par la composition nuageuse qui caractérise l'atmosphère terrestre. La puissance de l'énergie solaire reçue par la surface de la terre varie suivant le type de ciel. Elle est estimée à 1000 W/m^2 alors que pour un ciel couvert cette valeur atteint 250 W/m^2 . Ce rayonnement provient de trois composantes. Une première composante directe issue directement du soleil et qui s'annule quand le ciel est couvert ou quand il y a un obstacle qui cache le soleil. Une deuxième composante diffuse qui correspond au rayonnement reçu par la voûte céleste (seulement les rayonnements indirects). Ce rayonnement est diffusé de manière omnidirectionnelle à différentes proportions selon le type de ciel et la position du soleil dans l'horizon. Enfin une troisième composante réfléchie issue des rayonnements réfléchis par l'environnement extérieur (naturel et artificiel) ainsi que les surfaces intérieures de l'espace architectural (Cf. Fig 27).

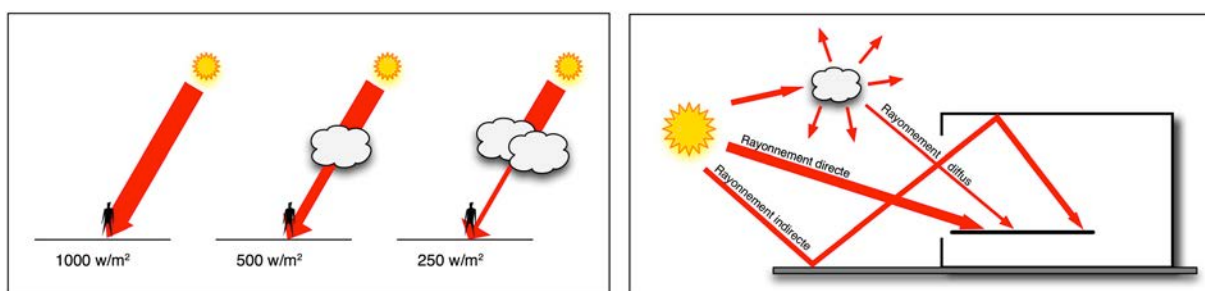


Fig 27. Variation de la puissance du rayonnement solaire sur la surface de la terre selon le type de ciel / les types de rayonnements solaires

L'orientation des surfaces exposées aux rayons solaires ainsi que leurs inclinaisons participent aussi à la détermination de la quantité d'apports solaires reçue par ces surfaces. Le graphe Fig 28 montre cette influence pour un point de mesure situé en Belgique. Une surface orientée au Sud avec une inclinaison de 40° reçoit le maximum d'apports solaires disponibles alors qu'une surface orientée au Nord avec une inclinaison 90° ne reçoit que 30% de ces apports.

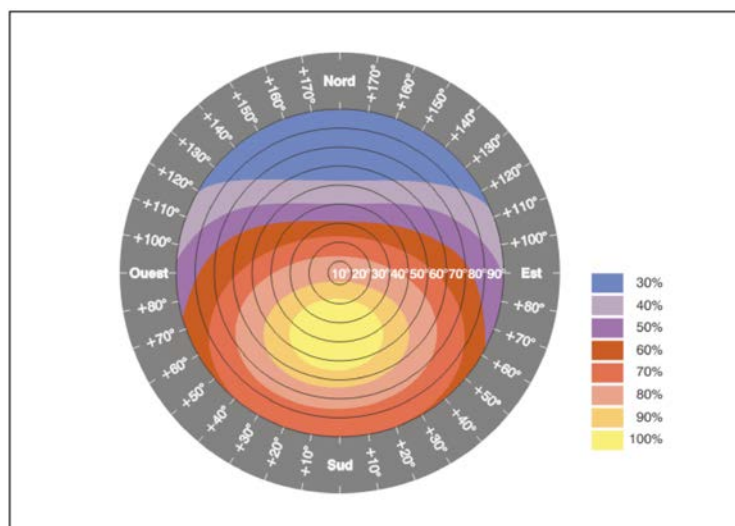


Fig 28. Variation de l'apport solaire selon l'orientation et l'inclinaison des faces en Belgique (Architecture et Climat, 2012)

Les apports solaires sont influencés par l'environnement naturel et l'environnement bâti qui modifient le comportement des rayonnements solaires. Le relief naturel masque les rayons de soleil incidents créant des zones occultées. Alors que la végétation filtre seulement les rayonnements solaires grâce à ses feuilles. Cette capacité de filtrage est de nature dynamique puisqu'elle varie suivant les saisons pour les arbres à feuilles caduques. L'environnement artificiel ou construit qui entoure l'espace architectural influence le mode de propagation des rayonnements solaires. Le sol extérieur entourant l'espace architectural a la capacité d'absorber ou de réfléchir le rayonnement solaire influençant ainsi la quantité et la qualité des apports solaires reçues sur les surfaces avoisinantes (Cf. Fig 29).



Fig 29. Masques solaires naturels / réflexion du rayonnement solaire par le sol

L'environnement architectural peut influencer la trajectoire des rayons solaires incidents à une surface déterminée. Il peut constituer un obstacle par rapport à la trajectoire des rayonnements solaires réduisant ainsi les apports solaires. Une influence apportée par les bâtiments avoisinant un ou bien par une partie du bâtiment lui-même. Cet environnement peut modifier la trajectoire des rayonnements en les réfléchissant dans d'autres directions constituant ainsi une source secondaire d'apport solaire (Cf. Fig 30).

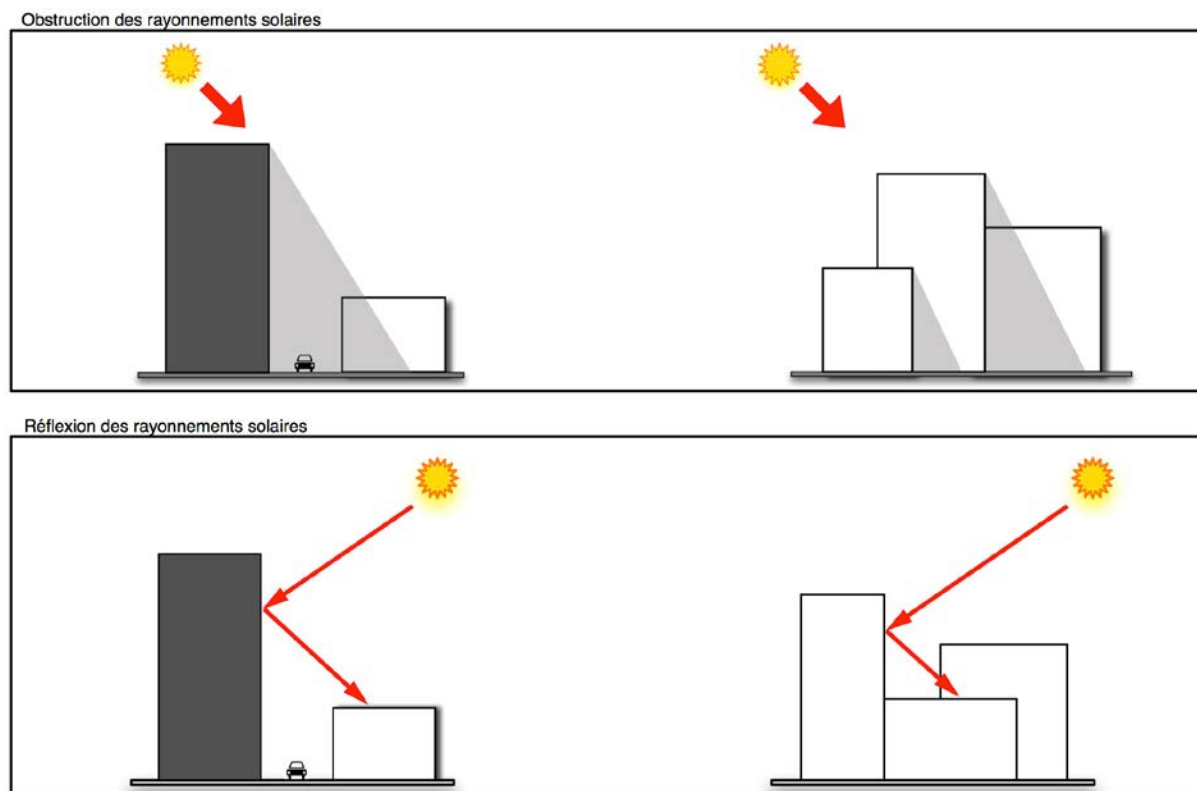


Fig 30. Obstruction des rayonnements solaires par l'environnement bâti / réflexion des rayonnements solaires par des écrans internes et externes au projet

1.6 Apports solaires et architecture

Nous essayons dans cette partie de caractériser le comportement des rayonnements solaires à une échelle architecturale. Il sera question de quantifier et de qualifier l'influence des composantes de l'espace architectural sur la captation et la propagation des apports lumineux. Cette influence est déterminée à partir de l'évaluation du comportement lumineux de cas d'étude sur lesquelles on a réalisé des simulations¹ quantitatives et qualitatives (rendu photo-réaliste, éclaircissement, luminance).

Nous portons une attention particulière à quatre composantes (Cf. Fig 31) :

- L'ouverture qui matérialise la liaison entre l'espace architectural et les rayons solaires
- La configuration architecturale déterminant la forme et la géométrie de l'espace
- Les surfaces intérieures de l'espace
- Les masques d'obstruction (internes et externes)

¹ L'ensemble des simulations, sauf indication contraire, sont réalisées sous le logiciel de simulation de la lumière *Radiance*® sous des conditions de ciel dégagé à la date du 21 juin à 10h, des ouvertures orientées au sud et une localisation géographique située à Nancy.

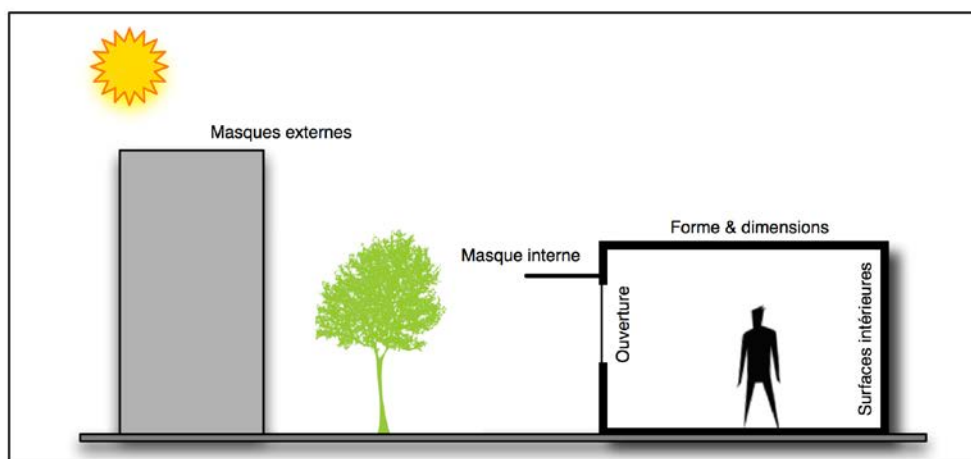


Fig 31. Les composantes régissant le rapport entre le rayonnement solaire et espace architectural

1.6.a La configuration architecturale

Le rapport entre la largeur et la profondeur d'un espace détermine la qualité des apports lumineux et leurs modes de répartition sur les différentes parois. La comparaison de trois configurations spatiales ayant la même surface au sol et possédant une ouverture avec un taux de 15% montre cette différence de répartition des apports lumineux. Un espace profond crée une répartition contrastée des apports lumineux divisant l'espace en deux zones distinctes. Une première zone fortement éclairée située à proximité de l'ouverture ($\frac{1}{3}$ de la profondeur) et une deuxième zone faiblement éclairée. Le niveau d'éclairement de la première zone peut être 10 à 20 fois supérieur à celui de la deuxième zone. Une configuration où la largeur de l'espace est supérieure à sa profondeur génère une répartition plus uniforme des apports solaires. Ce constat est confirmé par la moyenne d'éclairement obtenu qui est 2,5 fois supérieures à celle d'une configuration de type profonde. La simulation des luminances montre la répartition uniforme de la lumière sur les différentes parois ainsi que le sol et le plancher (Cf. Fig 32). A la différence du rapport de proportion entre largeur et profondeur, les dimensions de l'espace architectural n'ont pas d'influence sur son comportement lumineux. Trois configurations architecturales ayant le même rapport de proportion mais avec des dimensions différentes génèrent le même mode de répartition de lumière (Cf. Fig 33).

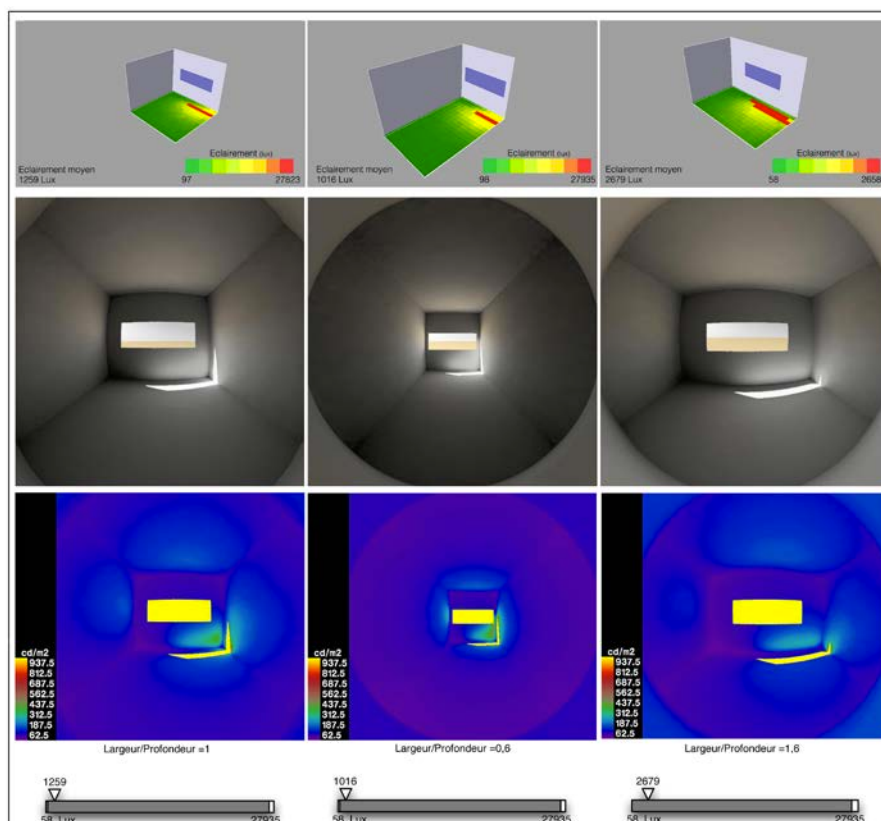


Fig 32. Influence du rapport largeur/profondeur sur le comportement lumineux d'un espace

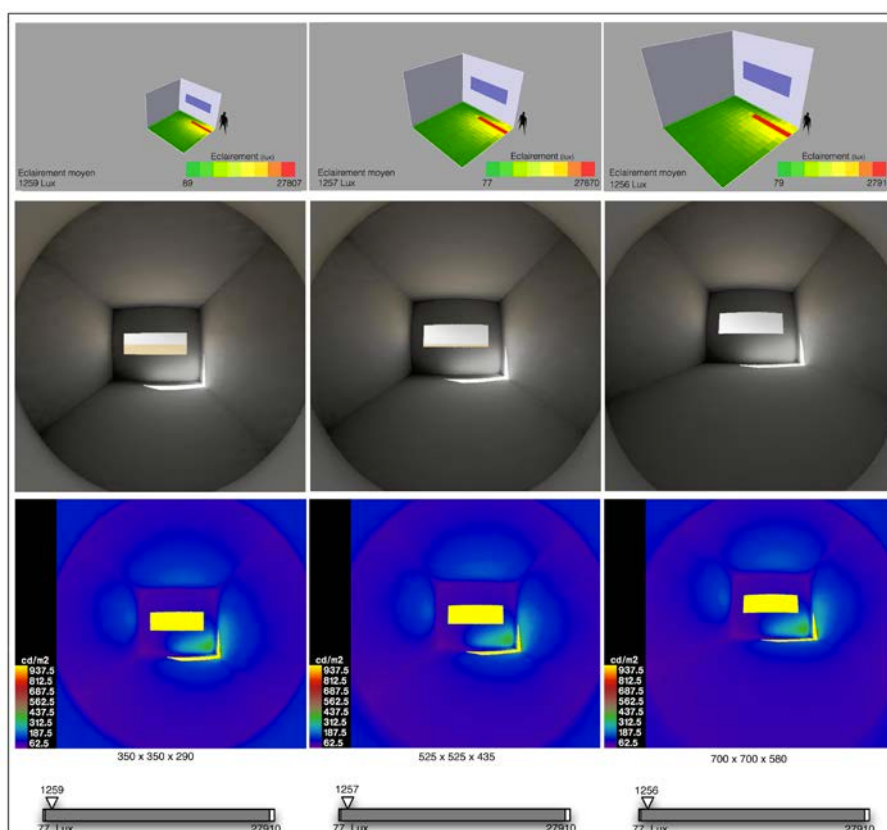


Fig 33. Influence de l'échelle de l'espace architectural sur le comportement lumineux

1.6.b L'ouverture

L'ouverture est l'interface entre les rayonnements solaires incidents et l'espace architectural. Elle constitue le facteur déterminant de la quantité et de la qualité des apports solaires qui pénètrent et occupent l'intérieur des espaces. La dimension de l'ouverture détermine la quantité de lumière à l'intérieure d'un espace. Cette propriété permet de dégager la notion de taux d'ouverture qui correspond au ratio entre la surface totale d'ouverture et la surface du plancher. Plus le taux d'ouverture est grand, plus la moyenne des éclairements est importante. Ce constat est confirmé par les résultats des simulations des éclairements sur trois configurations architecturales ayant des taux d'ouverture de 10, 15 et 20%. Pour les mêmes conditions de simulation, la dernière configuration (20%) crée une moyenne d'éclairément deux fois supérieure à la moyenne de la première configuration (10%) (Cf. Fig 34). La proportion d'ouverture est une propriété qui influence l'apport et le mode de répartition des rayonnements solaires reçus à l'intérieur d'un espace. Elle est définie comme étant le rapport entre sa largeur et sa hauteur. Une ouverture de proportion 1/1 permet d'obtenir une répartition omnidirectionnelle et une quantité plus importante de rayonnement solaire. Par contre, une ouverture de proportion égale à 1/3 apporte une quantité moins importante de rayonnements solaires qui se répartissent dans une direction bien particulière (Cf. Fig 35).

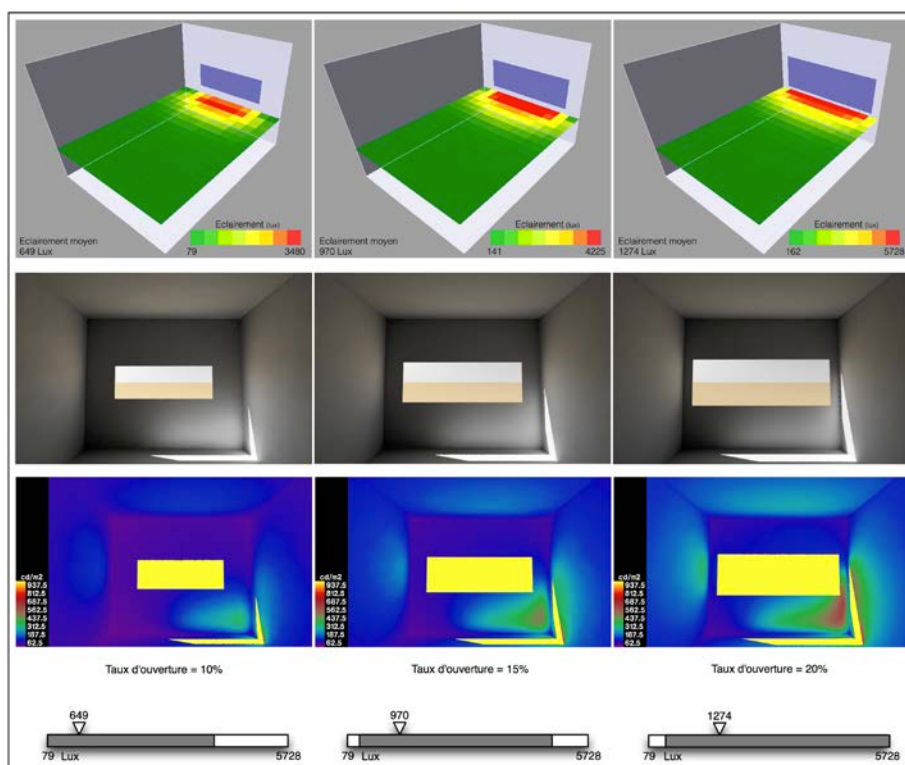


Fig 34. Rapport entre le taux d'ouverture et la moyenne d'éclairément obtenue

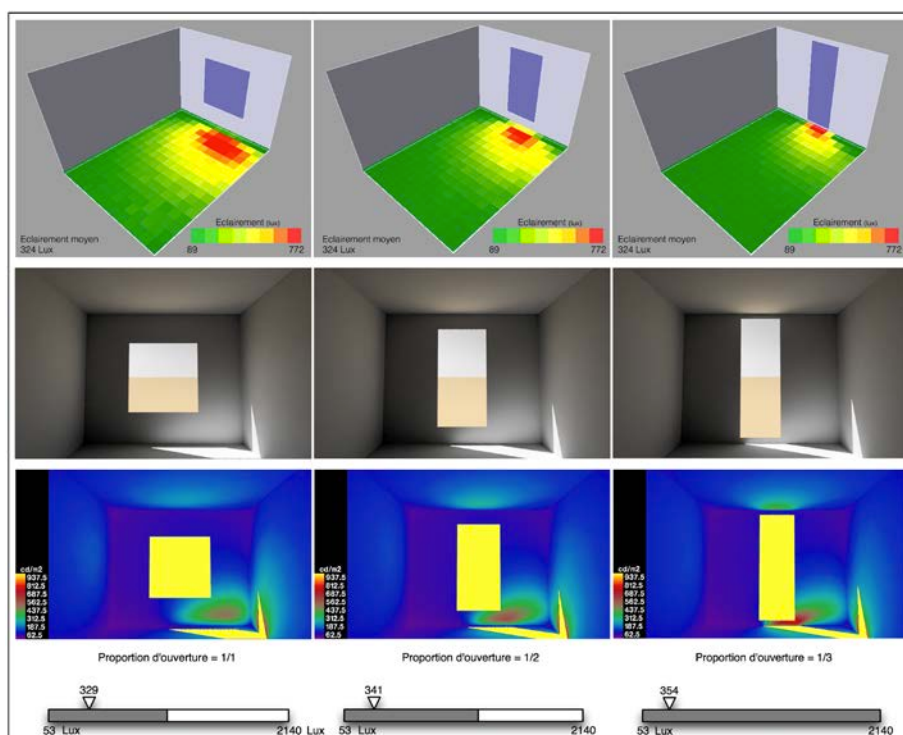


Fig 35. Influence du rapport de proportion sur le comportement d'une ouverture

La position de l'ouverture influence le mode de répartition des apports solaires dans le volume intérieur de l'espace. Cette influence est déterminée à partir de l'évaluation du comportement de la lumière naturelle pour trois configurations architecturales avec le même type d'ouverture placée à trois positions différentes. Une ouverture placée au centre de la façade permet d'obtenir une répartition uniforme des apports lumineux sur les différentes surfaces intérieures. Par contre, la même ouverture placée sur l'un des côtés de la façade crée une répartition contrastée de la lumière naturelle en favorisant un côté ou une face par rapport aux autres. Notons que ce paramètre n'a pas une grande influence sur la quantité d'apports solaires vu le faible écart entre les valeurs minimales, maximales et les moyennes d'éclairement pour les trois configurations testées (Cf. Fig 36). La répartition d'une surface d'ouverture en plusieurs parties influence la distribution des rayonnements solaires. Le nombre d'ouvertures crée ainsi des effets de lumière différents. Une ouverture assurant un taux d'ouverture de 15% et un rapport de proportion de 1/3 dirige les rayons lumineux dans une seule direction. La même surface d'ouverture répartie en deux ou trois sections dirige les rayons incidents dans plusieurs directions correspondant au nombre des sections. Ce type de configuration génère un jeu de taches solaires sur la face d'ouverture ou projeté sur l'ensemble des surfaces intérieures de l'espace. Les moyennes des éclairements des trois configurations présentées (Cf. Fig 37) sont proches montrant ainsi que ce paramètre n'a pas de grande influence sur la quantité d'apports lumineux à l'intérieur de l'espace.

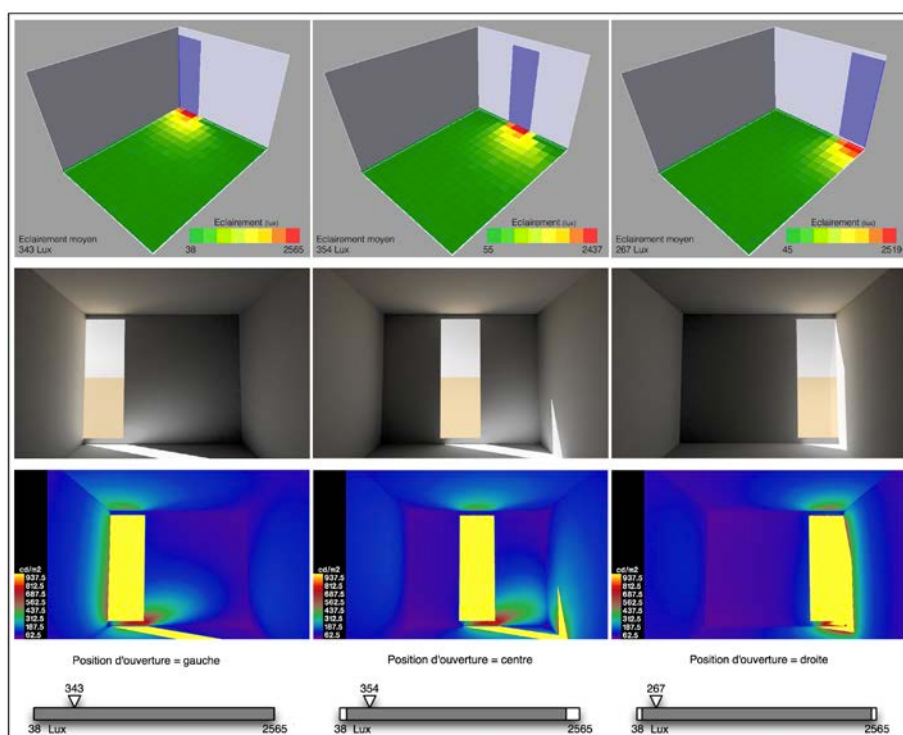


Fig 36. Influence de la position de l'ouverture sur le comportement de la lumière naturelle dans un espace architecturale

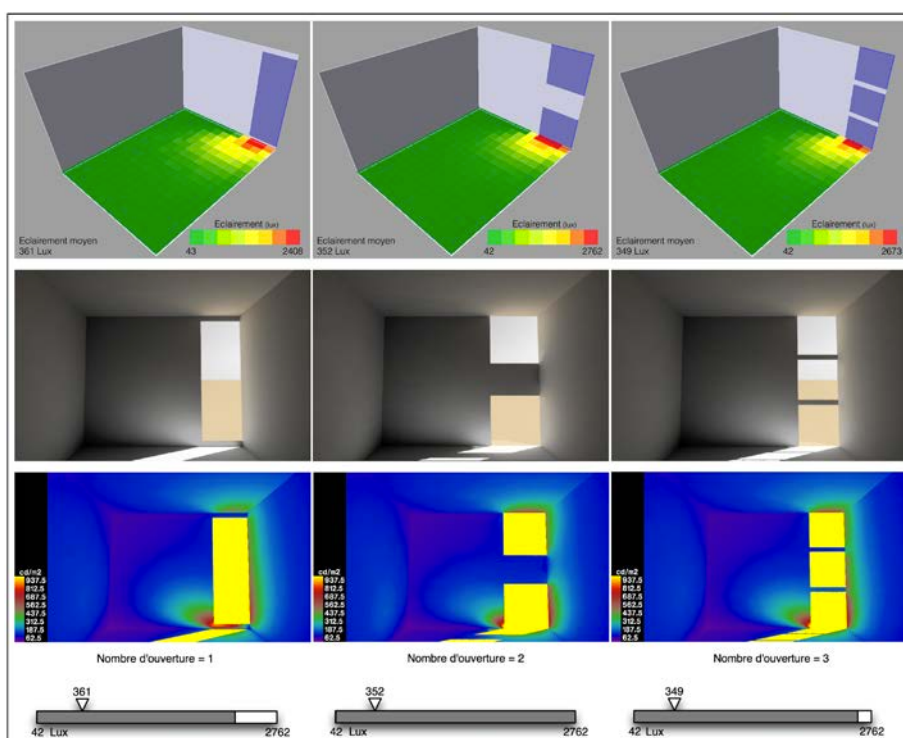


Fig 37. Influence du nombre d'ouvertures sur le comportement lumineux d'un espace architecturale

L'orientation des ouvertures fait appel à la notion de position du soleil dans le ciel ainsi que la direction de ses rayons. Dans l'hémisphère Nord, une ouverture orientée Sud, Est ou Ouest aura un apport de rayonnement solaire de type direct qui traverse l'espace architecturale. Ce type de rayonnement crée des taches solaires dont la taille et la position varient en fonction de l'heure et de la

saison. Par contre, une ouverture orientée au Nord aura un faible apport solaire de type indirect réparti d'une manière uniforme sur les différentes surfaces de l'espace. La moyenne des éclairagements dans les espaces avec une ouverture orientée au Nord est nettement plus faible que celles obtenues avec des ouvertures orientées dans les autres directions (Cf. Fig 38). Une ouverture positionnée sur un plan horizontal crée une répartition uniforme des rayonnements solaires couvrant ainsi toutes les surfaces composant l'espace. Cette uniformité de répartition est appuyée par les résultats de simulation des éclairagements au niveau du sol. En effet les valeurs des éclairagements présentent un faible écart type entre elles et un faible rapport de proportion entre la valeur maximale et la valeur minimale. La comparaison des résultats de simulation de la même configuration, mais pour des orientations différentes, montre que le mode de répartition de la lumière ne change pas d'une orientation à une autre. La seule différence se situe au niveau de la position de la tache solaire qui se déplace au fur et à mesure que l'on change d'orientation. Ainsi, le mode de propagation de la lumière créé par une ouverture située sur une face horizontale n'est pas influencé par le paramètre d'orientation. Ce comportement est largement différent de celui généré par une ouverture ayant les mêmes propriétés, mais positionné sur une face verticale (Cf. Fig 39)

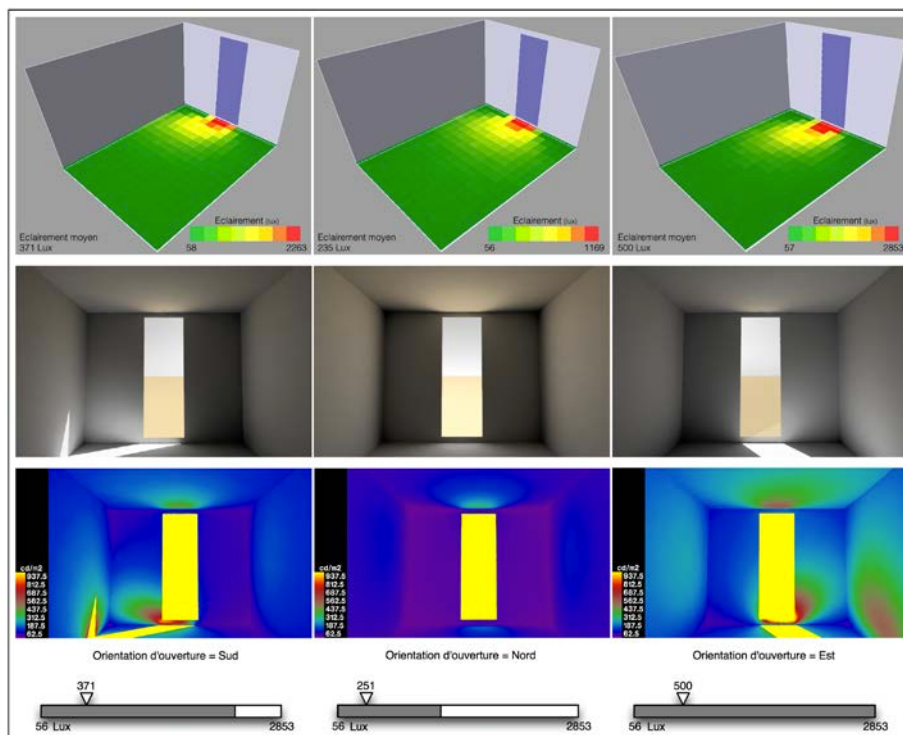


Fig 38. Influence de l'orientation d'une ouverture sur le comportement lumineux d'un espace

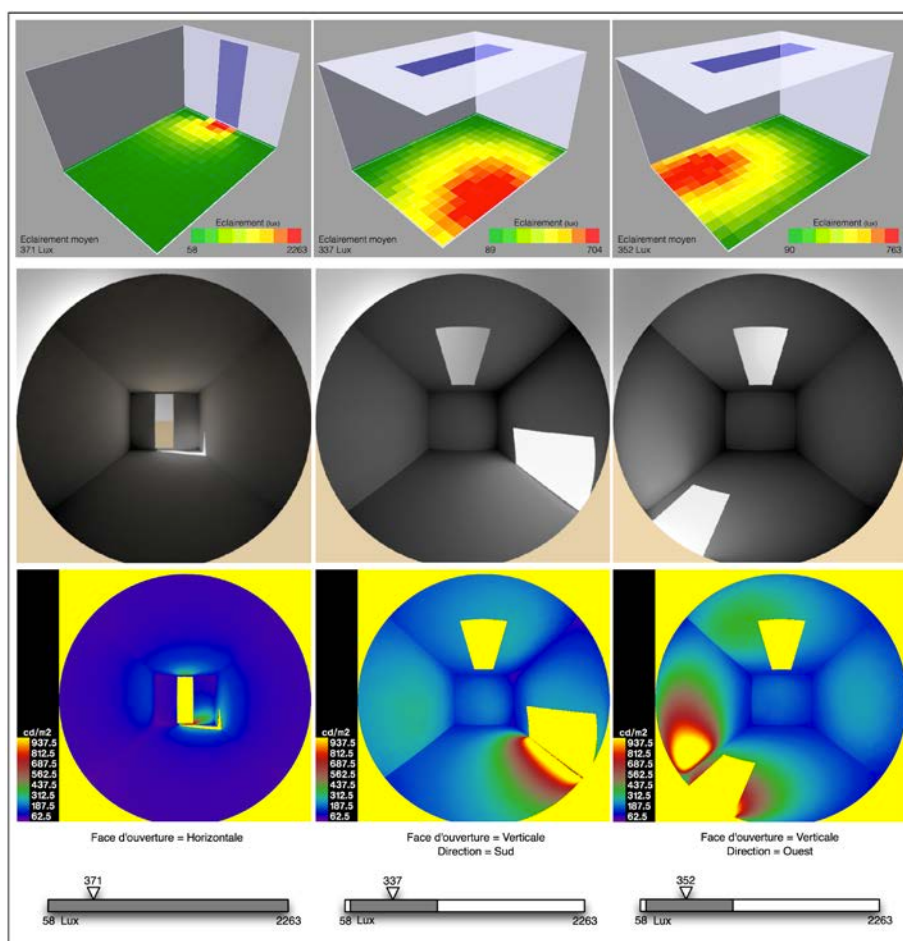


Fig 39. Influence de la disposition des ouvertures sur le comportement lumineux de l'espace architectural

Le mode de transmission du vitrage utilisé pour les ouvertures détermine la quantité et le mode de diffusion des apports solaires. D'un côté, une ouverture composée d'un vitrage de type directionnel ayant un taux de transmission de 90% permet d'apporter un éclairage moyen de 462 lux. Par contre, un vitrage avec un taux de transmission plus faible (72%) transmet moins de quantité de lumière sans pour autant modifier le mode de répartition des rayonnements solaires. D'un autre côté, l'utilisation d'un vitrage diffus ayant un taux de transmission de 20% apporte un éclairage moyen largement plus faible et influence particulièrement le mode de répartition des apports solaires qui sont distribués d'une manière uniforme sur les surfaces intérieures de l'espace (Cf. Fig 40).

Le type d'ouverture définit aussi le comportement lumineux d'un espace architectural. Un dispositif d'ouverture de type vertical simple apporte une lumière directe dont l'intensité diminue en fonction de la profondeur de la pièce. Il s'agit d'un dispositif qui crée un faible écart entre les zones proches de l'ouverture et celles du fond de la pièce. Alors qu'un dispositif de type zénithal, ayant le même taux d'ouverture, crée une lumière indirecte de très faible intensité qui se concentre sur une seule partie générant ainsi un fort contraste avec le reste de la pièce (Cf. Fig 41).

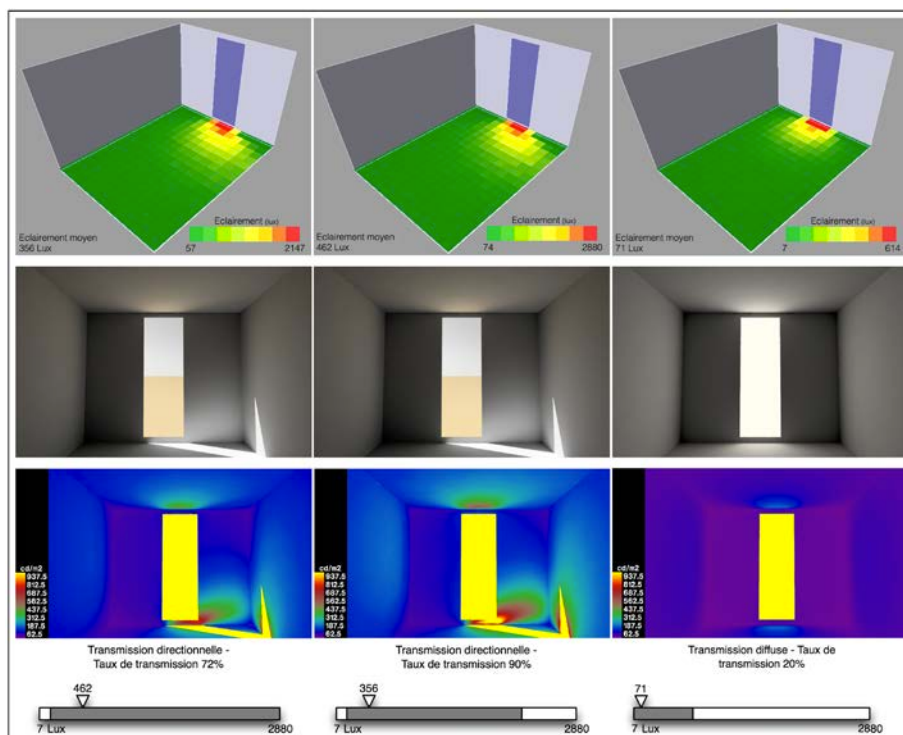


Fig 40. Influence du type de vitrage sur la quantité et la qualité de lumière d'un espace architectural

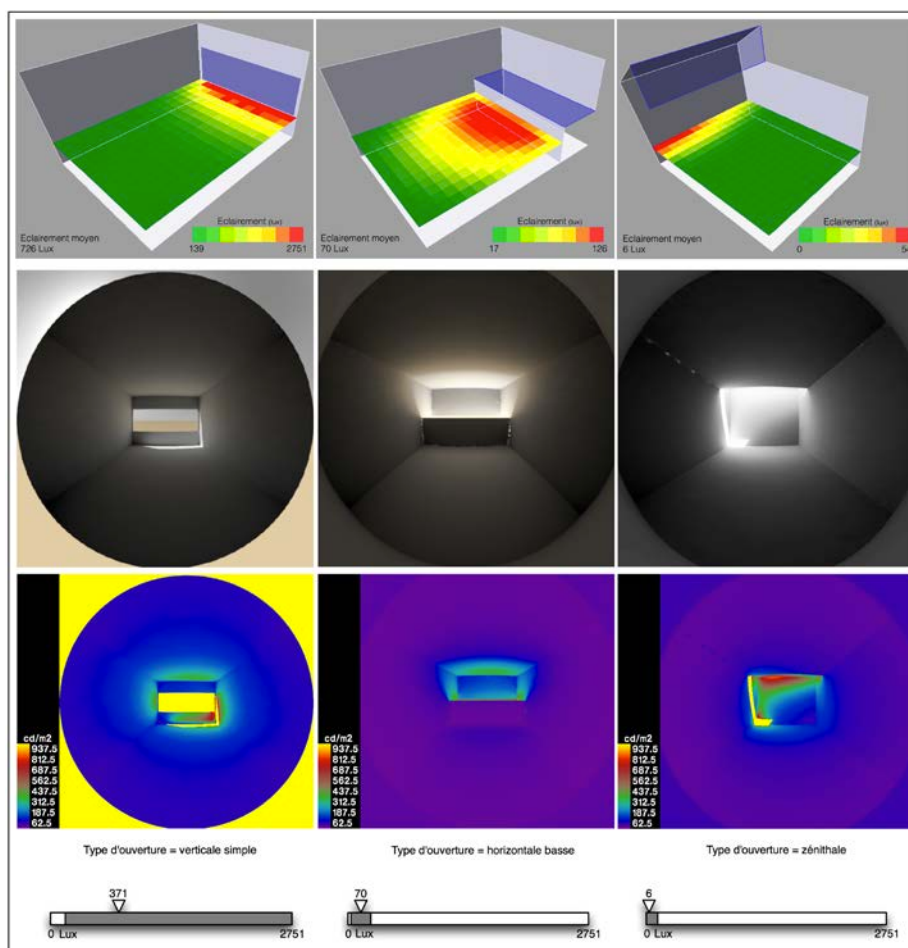


Fig 41. Influence du type d'ouverture sur le comportement lumineux de l'espace

1.6.c Les surfaces intérieures

L'étude de l'influence des ouvertures sur le comportement lumineux de l'espace architectural révèle l'importance des qualités intrinsèques des parois intérieures sur la répartition et la diffusion des apports lumineux. Les surfaces intérieures sont définies par un paramètre de réflexion et un autre de rugosité. Le premier paramètre détermine la capacité des parois à réfléchir la lumière incidente alors que le deuxième détermine la direction de cette réflexion. Un facteur de réflexion associé à un facteur de rugosité crée une réflexion diffuse des rayonnements solaires alors qu'un facteur de réflexion associé à un facteur de rugosité nul aboutit à une réflexion spéculaire de la lumière. La variation de la valeur des paramètres de réflexion et de rugosité n'a pas d'influence considérable sur la quantité et le mode de distribution des apports lumineux. Ce constat est validé par les résultats de simulation des trois configurations qui génèrent la même quantité de lumière et le même mode de répartition malgré la variation des valeurs de réflexion et de rugosité des parois (Cf. Fig 42). Sur le plan visuel, ces facteurs déterminent l'aspect perçu des parois. Les parois peuvent avoir un aspect mat quand le facteur de réflexion est nul et un aspect plus brillant pour des valeurs plus élevées. L'association des paramètres de réflexion et de rugosité donne un aspect flou aux surfaces.

Les parois sont caractérisées par leur couleur qui joue un rôle déterminant dans la définition de la qualité lumineuse. Dans les mêmes conditions d'éclairement, une pièce avec des parois de couleur, blanche permet de mieux distribuer les apports lumineux incidents qu'une pièce de même configuration, mais avec des parois plus sombres (couleur grise). Les simulations réalisées sur trois pièces ayant la même configuration mais des couleurs de parois différentes confirment ce constat. Les valeurs minimales et maximales ainsi que la moyenne des éclairements obtenus dans une pièce avec des parois blanches sont plus élevées que celle obtenue dans une pièce avec des parois grises. Les niveaux de luminance obtenue avec des parois blanches sont largement supérieurs à ceux obtenus avec les parois grises (Cf. Fig 42). Les pièces à parois sombres créent un contraste entre la zone proche des ouvertures (fortement éclairée) et le fond de la pièce (très faiblement éclairée). Alors qu'une pièce à surfaces claires génère un éclairement uniformément réparti sur toutes les zones et toutes les surfaces.

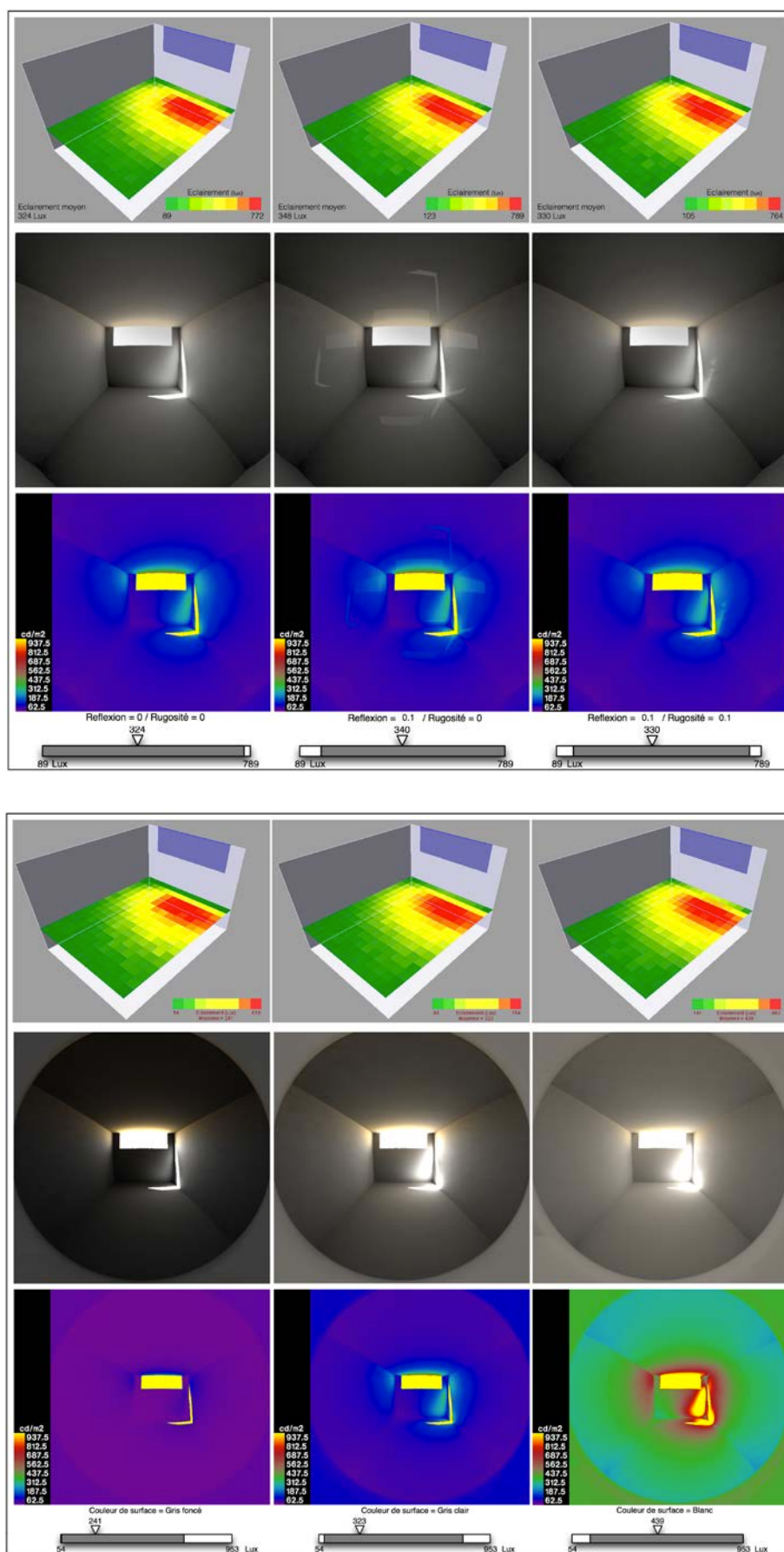


Fig 42. Influence des facteurs de réflexion et de rugosité / la clarté des parois et sur la propagation et la diffusion de la lumière

1.6.d Les masques

Le comportement lumineux est influencé par des masques internes et externes du projet. Les masques internes sont constitués d'éléments architecturaux (brise-soleil, débord de toiture) situés à proximité des ouvertures afin de contrôler la direction et la quantité des rayonnements solaires incidents. Ces masques peuvent avoir plusieurs formes selon l'orientation, la taille des ouvertures ainsi que le mode de contrôle que l'on veut instaurer. Ils influencent le comportement lumineux de plusieurs manières. Un auvent permet de masquer les rayonnements solaires directs créant une réduction du niveau d'éclairement reçu à l'intérieur de l'espace. Par contre, un masque de type loggia constitué de quatre parois qui encadrent l'ouverture réduit considérablement la quantité de lumière incidente en la répartissant d'une manière uniforme sur les surfaces intérieures de l'espace (Cf. Fig 43).

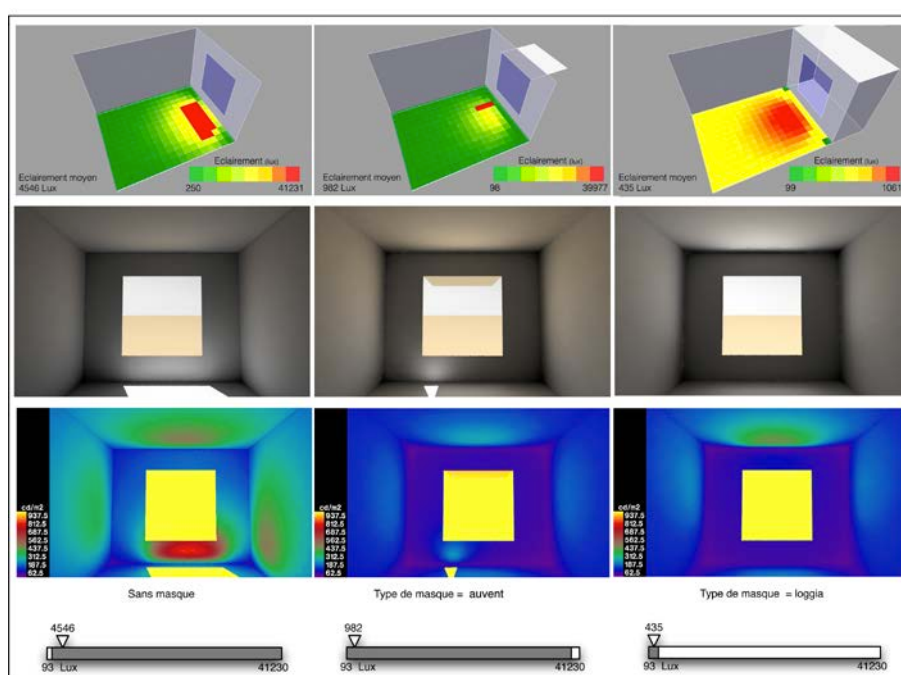


Fig 43. Influence des masques internes sur le comportement lumineux d'un espace

Les masques externes sont constitués de l'environnement naturel et architectural voisin qui influence la quantité d'apports solaires incidents à l'intérieur d'un espace. Les masques naturels de type végétation créent des filtres de lumière qui évoluent suivant les saisons permettant ainsi d'avoir un contrôle dynamique des apports lumineux à l'intérieur de l'espace architectural. Le positionnement d'un arbre de taille moyenne en face d'une ouverture orientée Sud permet de réduire la moyenne des éclairagements reçus de 1000 lux par rapport à une configuration identique sans masque. Notons que ce type de masque n'a pas d'influence remarquable sur la répartition de la lumière. Les bâtiments voisins constituent un deuxième type de masque extérieur. Ces bâtiments constituent des obstacles qui créent des zones d'ombres et d'obstruction de la lumière naturelle. Par contre, si ces surfaces sont

réfléchissantes, elles peuvent constituer une deuxième source de lumière indirecte favorisant ainsi les apports solaires et modifiant leurs trajectoires (Cf. Fig 44).

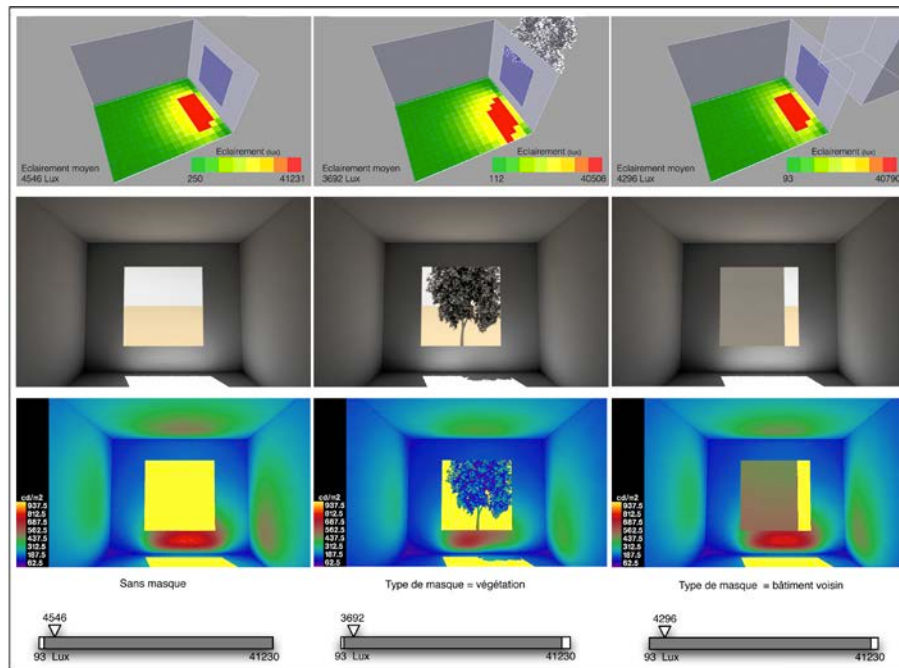


Fig 44. Influence des masques externes sur le comportement lumineux d'un espace

2. La dimension sensible de la lumière naturelle

La lumière naturelle est définie comme un phénomène physique exploitant le rayonnement solaire pour répondre à des fonctions d'éclairage à travers sa partie visible et à des besoins énergétiques par sa partie non visible. Mais la lumière naturelle peut être définie aussi sous un angle plus sensible décrivant son influence, comme effet visible, sur l'homme, le cadre bâti et l'environnement naturel qui l'entoure. Nous essayons de révéler cette dimension sensible à travers trois expériences. La première concerne le travail de mise en scène des peintres qui créent des ambiances lumineuses pour exprimer et mettre en valeur leurs intentions. La deuxième expérience est celle des architectes qui considèrent la lumière naturelle comme un outil de matérialisation de leurs concepts architecturaux. Enfin, une troisième expérience met en relief la perception de la lumière dans le cadre de la création cinématographique. L'objectif est de déterminer le mode de qualification de la lumière naturelle dans ces différents contextes et champs disciplinaires.

2.1 Lumière et peinture

La peinture considère la lumière comme un moyen d'expression de la sensibilité artistique de l'œuvre. Elle met en évidence le centre d'intérêt et le sujet de l'œuvre qui peut être matériel (un personnage, un lieu) ou un fait immatériel (historique, religieux, militaire ou sociétale). La lumière accentue l'émotion représentée dans la scène en soulignant et en détaillant les traits de relief ou de silhouette des

personnages et des objets représentés. Ce mode d'expression se base sur le jeu des ombres et de la lumière. Une variation et une transition des niveaux de transition entre ces deux états génèrent une typologie de lumière constituant l'empreinte de l'artiste. Ces types de lumière font appel aux notions qui caractérisent la lumière comme la direction, l'intensité, la couleur, la répartition dans l'espace. Le premier type d'effet est celui de « *lumière diagonale* » qui donne un sens de lecture et localise le centre d'intérêt de l'œuvre. Cette lumière dirigée laisse imaginer la position de la source de la lumière à travers le jeu de variation de l'intensité et son mode de répartition (Cf. Fig 45). Le deuxième type de « *lumière contrastée* » est matérialisé par une zone centrale, fortement éclairée et une zone périphérique qui occupe le reste de la scène, très faiblement éclairée. L'effet de contraste donne une lecture hiérarchique de la scène dirigeant l'attention et le regard de l'observateur vers la zone éclairée.



Fig 45. Le martyre de Saint Matthieu / Vocation de Saint Matthieu - Le Caravage (1599-1600)

« Un effet de valeurs sombres et de reflets dans un rendu de pénombre avec un peu de lumière dans l'image, mais surtout des ténèbres. L'ombre laissera supposer une lumière dont on devine la source » (Jungmann, 1996)

Ces effets véhiculent une connotation et une fonction plus spirituelle à l'œuvre picturale. La lumière dirigée et concentrée sur une zone ou un personnage particulier montre la présence divine. C'est une lumière qui montre la grâce de dieu qui rentre dans la vie des humains et les sorts de l'obscurité.

D'autres peintres s'opposent au dogme du violent jeu de contraste en proposant une lumière plus régulière répartie sur l'ensemble des éléments de scène représentée. Cet effet garde la même tonalité blanchâtre de lumière sur l'ensemble des zones composant la toile supprimant ainsi tout effet ou notion variation d'intensité de lumière. Il s'agit d'une « *lumière diffuse* », sans direction ni source précise (Cf. Fig 46). La hiérarchie entre les différents éléments de la scène est exprimée à travers le

jeu de contraste entre zones floues et zones précises. Le centre d'intérêt est représenté d'une manière très précise avec un niveau de finesse très élevé qui révèle les moindres détails et les qualités intrinsèques des objets et des personnages représentés. En revanche, les zones de second ordre ayant une faible importance pour la lecture de l'œuvre sont représentées d'une manière floue et imprécise. Cet effet d'« *irradiation de lumière* » (Bodkin, Goldscheider, 1940) présente un faible jeu d'ombres très floues et diffuses qui donnent une lecture réaliste de la scène sans créer de contraste.



Fig 46. La laitière - Johannes Vermeer (1656-1660) / Femme lisant une lettre - Gabriel Metsu (1662-1665)

« Des formes sous une lumière diaphane, des ombres floues autour de lumières grises comme leurs ombres. L'effet de lumière diffuse n'est pas un effet d'ombre, mais une absence de lumière et d'ombres réelles et précises, sans origines évidentes et sans directivités, un peu comme si les matériaux étaient translucides ou luminescents »
(Jungmann, 1996)

Les peintres impressionnistes fascinés par la représentation du rapport entre le personnage et le paysage naturel utilisent une lumière directe. C'est une lumière abondante qui englobe toute la scène et révèle sa matière et ses moindres détails. Ce mode de représentation matérialise la volonté de capter des phénomènes éphémères comme celui du mouvement du rayonnement solaire (Cf. Fig 47). L'effet d'ombre est présent, mais d'une manière très unitaire afin de mettre l'accent sur l'élément ou le personnage central de la scène. L'orientation de l'ombre portée nous laisse imaginer la position de la source de lumière. La hauteur, la couleur et la puissance des rayons de soleil correspondent à la saison ou la période représentée dans la scène. Cet effet de « *Lumière rasante* » est décrit comme « *un*

éclairage frisant, tangent à une surface et destiné à faire apparaître de faibles reliefs ou à renforcer des effets de modénatures déterminés » (Jungmann, 1996).



Fig 47. La pie (1869) / La promenade (1875) - Claude Monet

2.2 Lumière et architecture

Comme nous l'avons évoqué (*paragraphe* Partie A.Chapitre I.2) la lumière naturelle est considérée par les architectes comme un matériau de conception et de formalisation de leurs idées et leurs intentions. Ce matériau est modelé, adapté et sculpté pour matérialiser ou mettre en relief l'espace architectural. On parle de « *lumière émotion* » qui peut concentrer l'attention vers une zone particulière ayant un intérêt déterminant pour la lecture et l'identification de l'espace (Cf. Fig 48).

« L'objectif de la lumière-émotion est de capter l'attention pour produire une concentration » (Ciriani, 1991).

Cette attention est affirmée par le contraste entre le centre d'intérêt, très fortement éclairé, et les zones annexes, faiblement éclairées, constituant « *la pénombre : dialogue entre l'ombre et une lumière « solide » qui la transperce par endroits* » (Reiter, De Herde, 2004). Un effet de discontinuité avec l'extérieur à cause des limites massives qui séparent l'espace intérieur de son environnement extérieur. Cette séparation crée de l'émotion et attribue une dimension spirituelle à l'espace architectural. Une dimension accentuée par l'aspect épuré et brut des espaces intérieurs résultant de l'utilisation de matériaux comme le béton ou le parpaing. Ce type d'effet a fait la singularité des espaces religieux durant les différentes époques jusqu'à nos jours. Des architectes comme Le Corbusier ou Tadao Ando ont développé ce type d'effet dans leur architecture en utilisant des matériaux et des techniques de construction modernes.

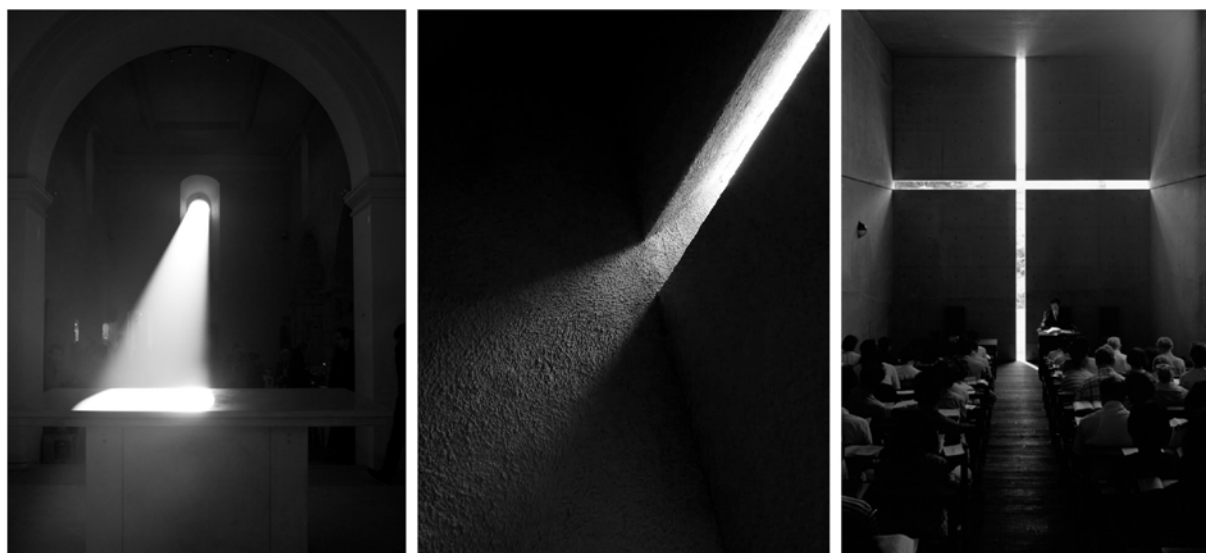


Fig 48. Abbaye de Valsaintes (XII) - Couvent de la Tourette (Le Corbusier, 1957) - The Church of light (Tadao Ando, 1989)

La révolution industrielle et les changements sociétaux qu'elle a générés ont donné naissance à une lumière plus fonctionnelle répondant à des besoins sanitaires. Ce type d'effet éclaire l'espace d'une manière globale et uniforme dans toutes les directions sans donner d'indication sur la position de la source.

«Une ambiance lumineuse: clarté ambiante, omniprésente d'une lumière qui tend à disparaître parce qu'elle est partout» (Reiter, De Herde, 2004).

Selon Henri Ciriani (Ciriani, 1991) cet effet de « *lumière-éclairage est issu du Nord, où l'on tend à trouver à l'intérieur les conditions lumineuses de l'extérieur* » créant une continuité spatiale entre ces deux environnements distincts. Cette continuité est le résultat de l'évolution des techniques de construction qui ont supprimé l'opacité et la massivité des parois extérieures en les remplaçant par de larges surfaces vitrées, continues ou segmentées, transmettant les conditions d'éclairage extérieur vers l'intérieur des espaces. Ce type d'effet de lumière diffuse équilibre la lecture et la perception de l'espace. Une homogénéité accentuée par l'absence de traces d'ombres nettes et précises. C'est une lumière invisible qui n'influence pas la perception de l'espace architectural ou de son contenu. Les ateliers d'artistes sont conçus pour produire ce type de lumière neutre qui n'influence pas la couleur et l'aspect de l'œuvre en cours de création. Les architectes choisissent la « *lumière éclairage* » pour concevoir leurs galeries et leurs espaces d'exposition. Cette lumière répond à un besoin fonctionnel et technique dans la mesure où elle n'influence pas la perception du visiteur et préserve les œuvres des dégradations causées par les rayonnements solaires directs.

L'architecture a usé de la « *lumière englobante* » ayant un rayonnement direct et une forte incidence. Elle présente les mêmes propriétés de continuité entre l'intérieur et l'extérieur que la « *lumière*

éclairage» mais avec quantité d'apports plus importante. Cette lumière inonde les espaces intérieurs en leur attribuant une connotation artistique et irradie leurs occupants.

«L'ambiance inondée : exaltation de la lumière qui embrase tout l'espace, trop plein de lumière envahissante et parfois écrasante.» (Reiter, De Herde, 2004)

La lumière naturelle est un outil de dessin et de représentation qui a permis aux architectes d'animer leurs espaces. Le traitement des enveloppes de l'espace architectural a modelé et coloré la lumière naturelle incidente en lui attribuant une dimension picturale. La *«lumière picturale»* exprime la volonté des architectes de construire la peinture (Ciriani, 1991). Le mouvement des rayonnements solaires et le changement de leurs intensités accentuent la dimension géométrique et graphique de ce type de lumière. Cette lumière sépare l'espace de sa réalité physique et statique en lui accordant une autre réalité virtuelle et dynamique. Elle a animé l'intérieur des églises grâce aux mutations des vitraux qui ont modelé et coloré le rayonnement solaire. Cette dimension picturale abstraite et épurée est présente dans d'autres cultures. Ce type d'effet est présent dans l'architecture Arabo-musulmane où les mucharabias filtrent et modèlent la lumière pour créer des tâches de forme géométrique pure qui anime l'espace.

«La lumière picturale essaie de se dégager de la source lumineuse, pour permettre à l'espace de se dégager de sa gravité. De même qu'un tableau sur un mur transforme le mur, la lumière picturale a cette capacité de transformer la matière.» (Ciriani, 1991).

Les architectes modernes comme Le Corbusier ou Jean Nouvel ont exploité cette dimension picturale à travers différents dispositifs pour créer un environnement spatial abstrait dégageant ainsi l'occupant du monde réel (Cf. Fig 49). Le principe de séparation entre la structure et la paroi crée des fresques murales à base de percement ou de surfaces vitrées projetant des taches de lumière de tailles et de proportions variables. La couleur des surfaces de contact entre l'intérieur et l'extérieur détermine la teinte de la lumière projetée.

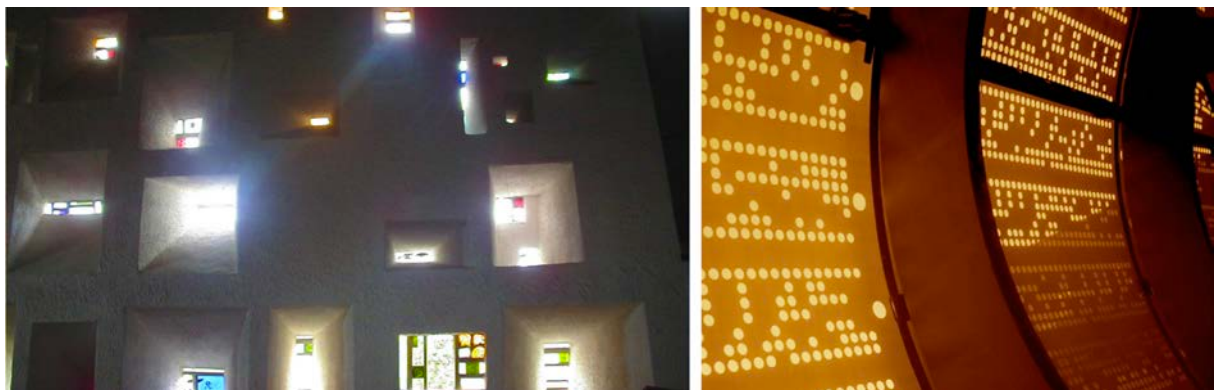


Fig 49. Chapelle de Ronchamp- Le Corbusier (1950-1955) / La cité internationale de la Dentelle et de la Mode de Calais - Moatti et Rivière (2006-2009)

2.3 Lumière et cinéma

La lumière est l'une des composantes majeures du domaine de la création cinématographique faisant partie des méthodes et des techniques d'expression des metteurs en scène. Elle donne un aspect réaliste à la scène de cinéma fidèle à la réalité matérielle de l'espace architectural. Elle est aussi un moyen d'écriture cinématographique mettant l'accent sur un personnage, sur une expression ou sur une émotion qui participe à la lecture du film. Cet outil de narration peut être capté dans un cadre spatial réel ou bien reconstituer dans un cadre virtuel plus flexible et plus maîtrisable.

«La mise en scène et la lumière sont inséparables, l'une n'existe pas sans l'autre et réciproquement...La lumière joue un rôle créateur puisqu'elle habille la matière.»
(Alekan, 1991).

Le contraste entre clair/obscur et la concentration de la lumière sur une zone particulière dirige l'attention du spectateur vers le centre d'intérêt de la scène. La lumière dirigée dans une direction verticale donne une dimension spirituelle et solennelle à la scène filmée. Elle constitue une lumière qui permet au metteur en scène de représenter et de faire ressentir au spectateur la présence d'une force majeure. Dans le film *Citizen Kane* (Welles, 1941), Gregg Toland a utilisé une lumière contrastée qui a sacralisé l'espace en lui donnant une connotation religieuse, puissante et surréelle (Cf. Fig 50). Les personnages sont de petite taille par rapport à celle du cadre spatial occupant une faible zone de l'image. Un large faisceau lumineux occupe le reste de l'image produisant une ambiance rappelant celles des espaces religieux. Ce type de lumière dirige le regard et l'attention du spectateur en exploitant la notion de phototropisme qui caractérise la perception humaine (Goujet, 2007).

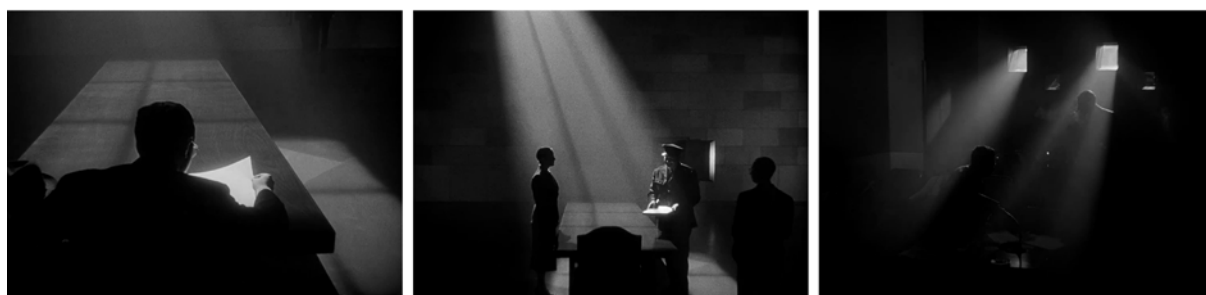


Fig 50. Eclairage des scènes dans *Citizen Kane* (Welles, 1941)

Un éclairage uniforme créant une lumière indirecte de très forte intensité qui se propage dans toutes les directions et sur tout l'espace est un signe de rationalité et de neutralité. Cette lumière équilibrée, stable et invariable qui ne génère pas d'ombre ou de reflet. Elle isole le spectateur du monde réel et le plonge dans un environnement virtuel proche du rêve. Le caractère imaginaire est accentué par l'aspect flou et diffus de ce type de lumière. Le cinéma fabrique la dimension imaginaire, virtuelle à travers une « *lumière céleste et enveloppante* » rappelant la notion de paradis immatériel. Ce type de lumière a été utilisé dans le film *Metropolis* (Lang, 1927) pour illuminer les scènes où les jeunes

seigneurs de la classe dominante vivent dans des jardins artificiels suspendus au-dessus de tours loin de la réalité misérable de la vie. Cette ambiance industrielle rappelle la lumière des serres et des jardins artificiels qui ont marqué le XIX^e siècle (Cf. Fig 51). Dans un autre contexte, la lumière diffuse a mis en évidence le caractère neutre et abstrait des espaces du futur artificiels et dirigés par la machine. Le film THX 1138 (Lucas, 1971) montre bien cette notion de neutralité avec des espaces très épurés de formes régulières habillées d'une lumière diffuse et constante. L'objectif est de sortir le spectateur de son cadre réel pour l'emmener dans un autre espace atemporel et invariable. Cet effet est accentué par l'aspect mat de la couleur blanche qui caractérise les différentes parois ainsi que les habits des personnages.



Fig 51. Jardin suspendu - Metropolis (Lang, 1927) / Cellule - THX 1138 (Lucas, 1971)

L'analyse du mode d'expression de la lumière naturelle montre qu'elle symbolise le même phénomène, mais dans des contextes et avec des codes différents. Elle crée un contraste entre zones éclairées et d'autres sombres attirant l'attention du spectateur et exprimant la présence d'une puissance extérieure et souvent divine. Ainsi, la lumière architecturale des églises qui éclaire l'autel comme une représentation de la puissance divine attire l'attention des fidèles de la même manière que la lumière qui structure les peintures. Cette lumière artistique dont le jeu savant des zones claires et obscures dirige le regard du spectateur vers le centre d'intérêt de l'œuvre. La même lumière compose le plan de cinéma où *«la star fera son entrée nimbée de lumière au milieu de l'assemblée et sera le centre d'attraction visuel»* (Goujet, 2007).

À partir de cette comparaison nous pouvons déclarer que la lumière naturelle, avec ses différents types, est un moyen d'expression des intentions et de création des émotions aussi bien dans la peinture, dans l'architecture que dans le cinéma. Ce moyen d'expression dispose d'une symbolique commune malgré la différence des domaines d'application.

3. Le rapport entre la dimension physique et la dimension sensible de la lumière naturelle

«L'évaluation simultanée des aspects qualitatifs et quantitatifs de la lumière devrait contribuer à une critique de l'espace-lumière et initier un discours d'éclairage architectural sur des bases théoriques solides» (Demers, 1997b).

La corrélation entre la dimension quantitative et la dimension qualitative de la lumière naturelle ouvre la perspective de mise en place d'une méthode de caractérisation des effets perceptibles de la lumière faisant appel à des paramètres mesurables. Ces paramètres établissent une classification objective des types de lumières générés dans l'espace architectural. Le but est de maîtriser le processus d'intégration et de génération des effets de lumière naturelle dans une démarche de conception en partant d'objectifs qualitatifs et perceptibles. Marie-Claude Dubois (Dubois, 2006) propose une liste d'indicateurs de performance qui décrivent le comportement de la lumière naturelle. Les valeurs quantitatives attribuées aux différents facteurs donnent une interprétation de la dimension qualitative de la lumière naturelle (Cf. Tab 1). Les plages de valeurs ainsi que leurs interprétations qualitatives sont issues d'autres travaux de recherche de l'auteure et de normes liées à l'éclairage naturel des bâtiments.

Indicator	Value	Interpretation
Daylight Factor	see recommendations for the type of space in lighting standards	
	< 1%	too dark
	2 %	minimum acceptable
	> 5%	looks substantially daylight [11]
Horizontal illuminance	> 10%	risk for overheating
	see recommendations for the type of space in lighting standards	
	> 500 lx	too bright for computer work, stabilisation of visible performance curve [2]
	> 1000 lx	appropriate for circadian Cycle [3]
Absolute luminance	10^{-5} cd/m ²	threshold for visibility [12]
	< 30 cd/m ²	too dark for vertical walls
	> 500 cd/m ²	too bright for art. lights, center of visual field
	> 1000 cd/m ²	too bright for art. lights, in field of view
	> 2000 cd/m ²	too bright for art. lights
	> 5000 cd/m ²	unacceptably bright [12]
Luminance ratios	1:3	smooth transition between too surfaces
	1:10	limit of acceptability for transition between adjacent surfaces
	1:40	upper limit for acceptable contrast in space
	1:13	suitable ratio for visual interest in 40° band [13].
Vertical-to-horizontal illuminance	2-3	balanced 3D lighting [14]
Direct sunlight patches		Some necessary for stimulation and mood Avoid large patches causing glare

Tab 1. Liste des indicateurs qualitatifs de la lumière naturelle (Dubois, 2006)

Ce tableau d'indicateurs constitue une référence permettant une lecture sensible et qualitative de la lumière naturelle en partant d'un ensemble de valeurs de facteurs quantitatifs. Ainsi, une lumière présentant une valeur de facteur de lumière du jour inférieure à 1% est considérée comme « *trop sombre* », alors qu'une valeur d'éclairement supérieure à 500 lux est jugée « *brillante et inadaptée à un travail sur un écran d'ordinateur* ».

Dans le même contexte, Claude MH Demers (Demers, 1997a) propose une méthode d'analyse et de caractérisation des effets de lumière en partant d'images numérisées de surfaces planes éclairées. Ces images numérisées sont analysées pour séparer leurs pixels en plusieurs niveaux de brillance et qui peuvent donner une évaluation sommaire des intensités de la lumière (Hopkinson, 1963). Une description typologique de la lumière est obtenue à partir du traitement des images constituant des patterns d'effets de lumière. Ils caractérisent l'aspect morphologique de la lumière naturelle et son mode de propagation dans l'espace en déterminant l'intensité de la lumière, sa concentration et le niveau de contraste. Ainsi, une image représentant un effet de lumière naturelle est analysée en plusieurs niveaux de brillances représentées par différents tons de gris. Ces derniers, souvent au nombre de cinq, varient du blanc (100%) au noir (0%) (Cf. Fig 52). L'intérêt de cette méthode réside dans la possibilité de quantifier et de qualifier les caractéristiques d'un effet de lumière en partant de données perceptibles non mesurables à savoir, une image.

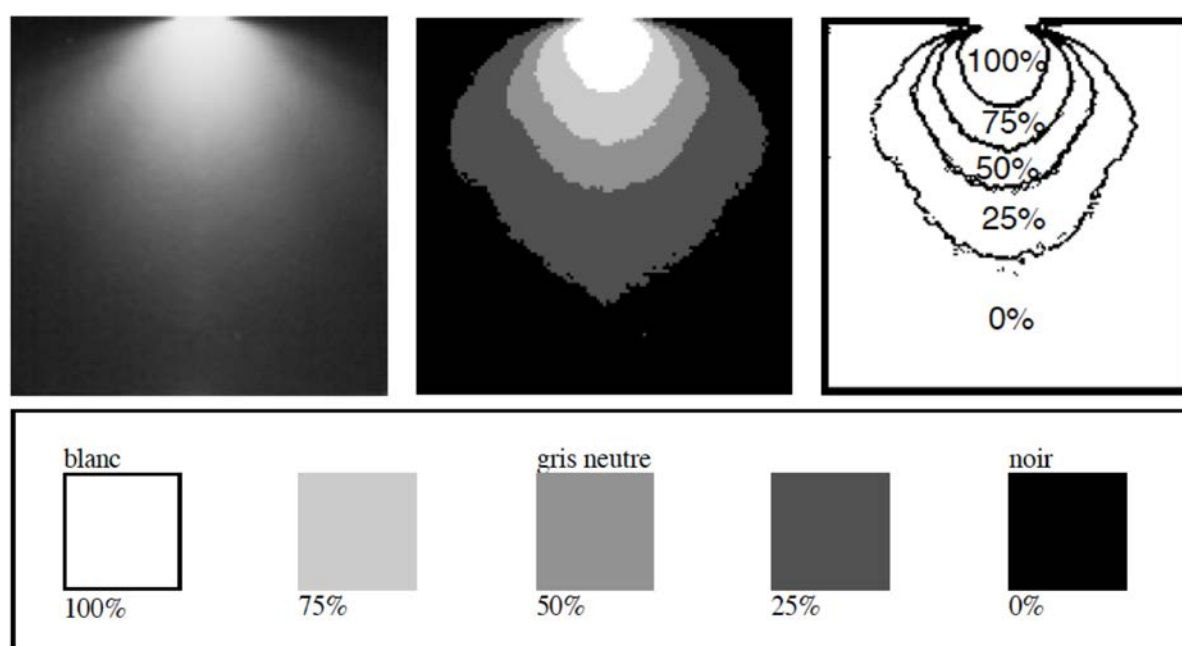


Fig 52. Méthode d'identification des patterns de lumière (Demers, 1997b)

D'autres méthodes proposent des solutions de caractérisation de la lumière à partir d'une analyse d'image. Wing Lam Lo et Koen Steemers (Lam Lo, Koen Steemers, 2009) utilisent des images de projets réels et des images issues de simulation de configurations architecturales abstraites pour caractériser la dimension perceptible de la lumière naturelle. Les propriétés de luminosité issues de

l'analyse des pixels des images sont représentées par deux indicateurs, IM^2 et ISD^3 . Le facteur IM correspond à la moyenne de l'intensité des pixels d'une image mesurant ainsi le niveau de brillance d'une image. Plus cette valeur est grande plus l'espace est brillant. Alors que le facteur ISD correspond à l'écart type de l'intensité des pixels d'une image décrivant le contraste de brillance d'un espace. Une faible valeur de ISD signifie un faible écart entre les valeurs d'intensité des pixels et ainsi une lumière de faible contraste. Ces valeurs sont calculées par la fonction histogramme de luminosité du logiciel de traitement d'image Photoshop®. Les images analysées sont présentées à un ensemble de participants (architecte et non-architecte) en leur demandant de qualifier chacune des images selon deux échelles sémantiques. La première échelle concerne la dimension Profane/Sacrée de la lumière présente sur les images alors que la deuxième échelle porte sur la dimension Fonctionnelle/Poétique des effets de lumière. L'objectif de la méthode est de comparer les valeurs des indicateurs de brillance et les résultats de l'évaluation sémantique afin de mettre en évidence les corrélations qui existent entre la dimension subjective et perceptible de lumière. Le résultat de la comparaison montre qu'un espace considéré comme «*sacré*» est caractérisé par une faible brillance (faibles valeurs pour la moyenne d'intensité IM) un fort contraste (fortes valeurs pour l'écart type d'intensité ISD). Ce constat est le même pour les espaces qualifiés comme «*poétique*». En revanche, un espace à connotation «*profane*» ou «*fonctionnelle*» possède une lumière de forte brillance et un faible contraste correspondant à des valeurs de moyennes d'intensité élevées et des valeurs d'écart type d'intensité très basses (Cf. Fig 53). Cette étude révèle l'influence d'autres paramètres sur la perception et la caractérisation des effets de lumière naturelle. Parmi ces derniers la taille d'ouverture où un espace avec une grande surface d'ouverture est considérée comme *Profane/Fonctionnelle* alors qu'un espace avec une surface d'ouverture réduite est perçu comme *Sacré/Poétique*.



Fig 53. Espace fonctionnel/profane (gauche) - Espace sacré/Poétique (droite)

Claude MH Demers (Demers, 1997b) a mis en place une classification des effets de lumière selon deux échelles d'évaluation : une échelle de contraste et une échelle de focalisation. La première

² IM : Intensity Mean

³ ISD : Intensity Standard Deviation

échelle fait appel à la notion de contraste qui associe la dimension qualitative et quantitative de la lumière. L'échelle de contraste est composée de quatre niveaux variant du faible contraste vers le contraste élevé (Cf. Fig 55). Cette échelle est déterminée à partir de critères portant sur l'aspect physique (qualité de la source, distribution des luminances et dominance du pattern) et l'aspect perceptuel de la lumière (perception de l'espace, perception des objets et concentration). Un domaine de variation est défini pour évaluer et déterminer la valeur attribuée à chacun des critères.

La deuxième échelle de focalisation a comme référence l'échelle des ombres et l'échelle de la lumière proposée par Sophus Frandsen (Frandsen, 1989). Ce dernier propose 10 intervalles et 11 types d'ombres dont chacun est caractérisé par une illumination spécifique sur trois surfaces distinctes d'une sphère éclairée par une source de lumière circulaire. La première surface totalement éclairée par la source, une deuxième surface à l'opposé de la source ne recevant aucune lumière (totalement sombre) et enfin une troisième surface positionnée entre la surface 1 et la surface 2 recevant une part variable d'éclairage avec un ombrage partiel. Cette surface intermédiaire est la plus déterminante dans la qualification des ombres et des lumières puisqu'elle montre le mode de transition entre la partie sombre et la partie éclairée. Ainsi, la taille de cette surface intermédiaire détermine les intervalles de variation de l'échelle des ombres (Cf. Fig 54). La classification des types d'ombre permet de définir une échelle de lumière composée de quatre types :

- La lumière de type «*Room & Totality*» qui couvre les types d'ombres de type 4 ½ - 10
- La lumière type «*Furniture*» qui couvre les types d'ombres de type 3 - 7
- La lumière type «*Objets*» qui couvre les types d'ombres de type 1 ½ - 4 ½
- La lumière type «*Textures*» qui couvre les types d'ombres de type 0 - 1 ½

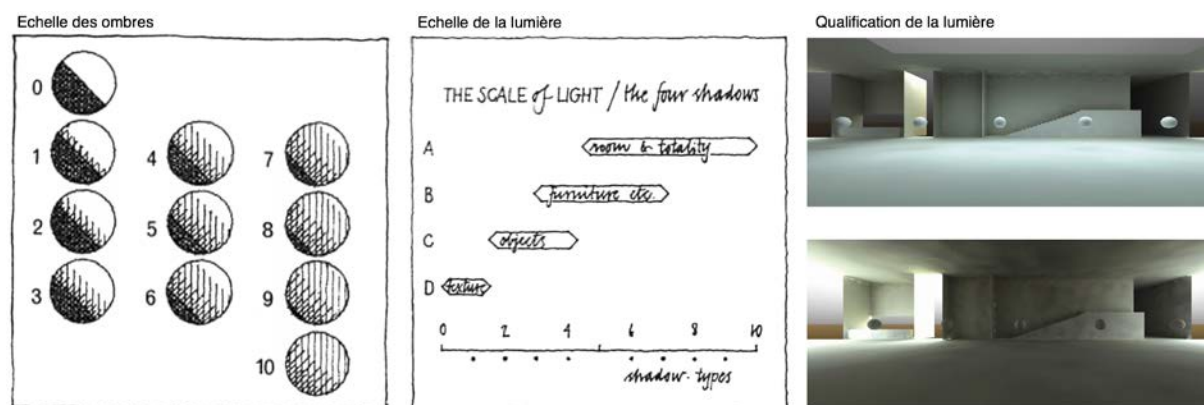


Fig 54. Echelle des ombres et échelle de la lumière (Frandsen, 1989) / Qualification de la lumière (Dubois, 2006)

En prenant comme référence cette classification, Claude MH Demers propose une échelle de la focalisation composée de quatre niveaux de perception de la lumière en partant de la lumière détaillée qui éclaire les textures et arrivant à la lumière globale qui éclaire l'espace (Cf. Fig 55). Ainsi, une lumière à l'échelle de l'espace est une lumière diffuse et omnidirectionnelle alors qu'une lumière à

l'échelle des textures est une lumière dirigée dans une direction précise avec une source et une cible bien déterminées. La combinaison des deux échelles précédentes crée une troisième échelle de concentrations proposant une caractérisation visuelle/physique et une classification des types de lumières. Cette échelle propose une grille d'effets qui varie d'un niveau de concentration faible à un niveau de concentration fort. Le premier niveau correspondant à une lumière diffuse qui donne un aspect flou aux détails, alors que le deuxième niveau de concentration correspondant à une lumière forte caractérisée par un niveau de contraste élevé et une focalisation sur les détails.

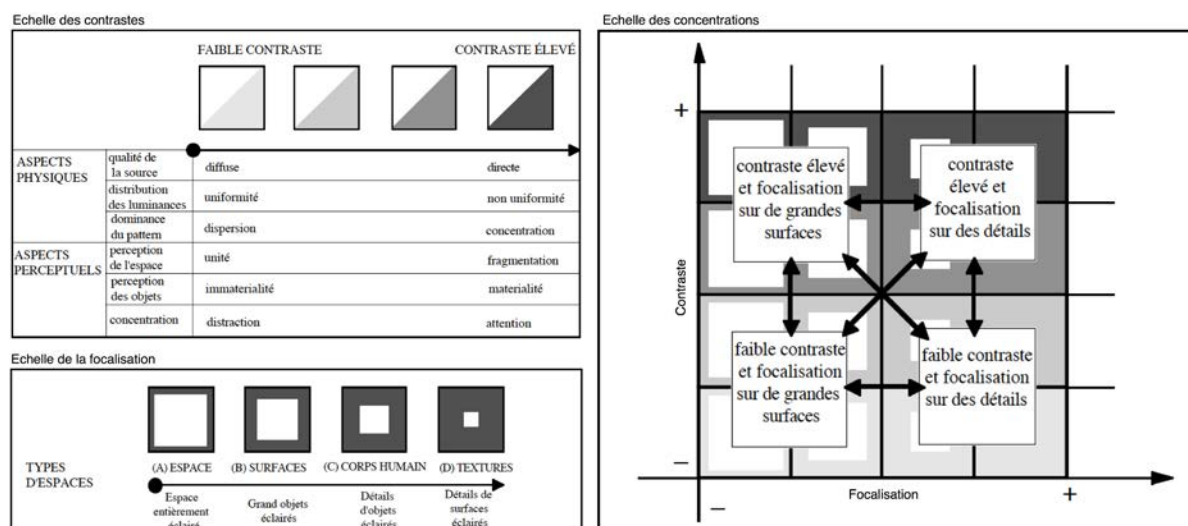


Fig 55. Echelle des contrastes et échelle de la focalisation (Demers, 1997b)

Ljubica Mudri (Mudri, 2002) utilise la notion de contraste pour analyser et caractériser les ambiances de lumière naturelle en milieu architectural. Ce ratio est défini comme étant le rapport entre le niveau de luminance d'une première surface L_0 et une deuxième surface L_1 d'un espace intérieur ($C = L_0 / L_1$). Les valeurs de luminance proviennent de campagnes de mesures réalisées sur les surfaces opaques et vitrées d'espaces de référence présentant un intérêt pour les ambiances de lumière naturelle. Ces mesures sont faites en suivant un protocole assurant la validité des résultats. Les valeurs et les points de mesures sont reportés et localisés sur une photo prise au moment et à partir du point d'évaluation. Les résultats des campagnes de mesure sont interprétés pour définir des zones avec un type de contraste particulier. Le type de contraste est déterminé selon une échelle d'appréciation qualitative des intervalles de ratio de contraste. Ainsi pour le cas d'étude de la cafétéria du conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris, la zone qui intègre les points de mesure 1, 2, 3 et 23 (Cf. Fig 56) présente un indice de contraste maximum de $1/50$ et crée un contraste qualifié comme «*extrêmement fort*». En revanche, la zone constituée à partir des points 10, 11, 12, 13 et 14 a un indice de contraste maximum de $1/3$ décrivant un contraste de lumière de type «*très léger*». Cette méthode permet de diviser l'espace en différentes zones selon leur ratio de contraste constituant un premier niveau de description qualitative des effets de lumière en prenant comme références des données quantitatives. Les premiers résultats sont ensuite comparés aux appréciations des utilisateurs

(résultats d'enquêtes sur site) et des intentions exprimées par les architectes (si elles sont disponibles) reliant ainsi la dimension quantitative/technique (mesures, ratios, plages de valeurs, zones, mode de transition) et la dimension sensible de la lumière naturelle (exprimé par les architectes et les utilisateurs). Les zones présentant un fort indice de contraste et une transition brutale entre les niveaux de luminance sont qualifiées comme « bruyante », alors que les zones présentant un faible indice de contraste et une transition progressive entre les niveaux de luminance sont considérées comme « calme ». Le jeu de « bruit » et de « calme » exprimé par l'architecte correspond aux jeux de niveau de contraste « fort » et « faible » ce qui présente une cohérence entre la description qualitative des concepteurs et la caractérisation quantitative issue des différentes mesures.

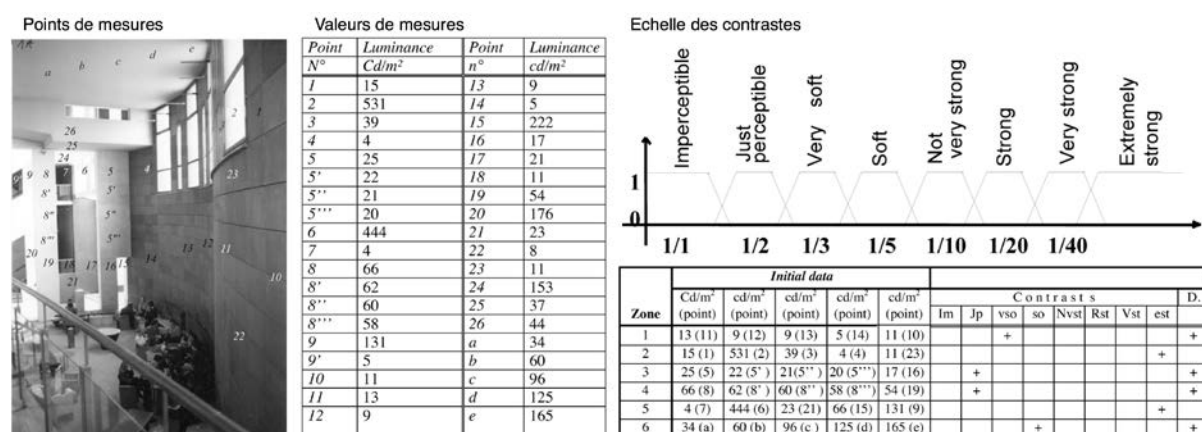


Fig 56. Caractérisation quantitative et qualitative de la lumière naturelle (Mudri, Lenard, 1999)

4. Synthèse

Nous avons mis en avant dans ce chapitre les paramètres qui influencent le comportement de la lumière naturelle dans un cadre architectural. Ces paramètres déterminent le type et la quantité d'apports lumineux incidents ainsi que leurs modes de répartition sur les parois de l'espace. Ensuite, nous avons essayé d'identifier les modes de caractérisations qualitatives des effets et des ambiances lumineuses dans différents domaines comme la peinture, l'architecture et le cinéma. Cette étude a mis en évidence une typologie de lumière commune à l'ensemble des domaines étudiés. Ces types de lumière ont une dimension sémantique qui participe à la création, la lecture et la compréhension de l'œuvre picturale, architecturale ou cinématographique. Enfin, nous avons cherché des méthodes de corrélation entre l'aspect physique/quantitatif et l'aspect sémantique/qualitatif de la lumière naturelle. Cette recherche a mis en relief des méthodes de caractérisation mixtes qui associent ces deux aspects. Nous avons pu ainsi identifier des facteurs permettant une double lecture (quantitative et qualitative) des effets de lumière naturelle dont le ratio de contraste et les écarts type de luminances relevés à partir de campagnes de mesures (sur site et à partir d'analyses d'images).

Suite à cette étape, il nous semble intéressant, dans un premier temps, d'identifier la manière avec laquelle la question de l'intégration de la lumière naturelle est prise en compte durant le processus de conception architecturale. En deuxième temps, nous mettrons en relief les formes de représentations de cet intérêt et leurs évolutions tout au long du processus de création.

Chapitre III. Lumière et conception architecturale

La partie précédente illustre les niveaux d'influences et d'échanges mutuels qui caractérisent le couple lumière naturelle et architecture. Ces rapports sont présents sous la forme d'intentions et de contraintes de conception et participent d'une manière directe aux différentes phases de conception du projet d'architecture. Ce sont ces intentions et ces contraintes que le concepteur essaye de formaliser et de vérifier dans ses projets.

Nous essayons, dans ce chapitre, de situer et de caractériser la prise en compte de la lumière naturelle dans le processus de conception architecturale. Nous commençons ainsi par caractériser le processus de conception architectural et mettre en évidence les phases et les activités de conception. Cette caractérisation nous permettra ensuite d'identifier les formes et le moment d'intégration de la lumière naturelle dans le processus de conception.

1. Caractérisation du processus de conception architecturale

La conception architecturale⁴ est définie comme « *l'activité intellectuelle qui, en réponse à une demande (un programme), produit les idées permettant la mise en œuvre de toutes les connaissances et savoir-faire professionnels pour l'instrumentation du projet ainsi que tous les documents nécessaires à la construction d'un édifice dans les règles de l'art.* » (Porada, 1997).

De nombreuses recherches portent sur la définition et la caractérisation de la conception architecturale. Selon Dominique Raynaud ces recherches se divisent en deux grandes familles. Une première famille dite « *externaliste* » envisage la conception architecturale comme un lieu d'interactions sociales entre acteurs. Par opposition la deuxième famille dite « *internaliste* » s'intéresse à l'aspect cognitif de la conception architecturale. Cette famille de recherches « inspirées par les travaux de Herbert A. Simon, se démarquent par leur intérêt pour l'étude des processus (vs. états) de conception d'objets virtuels

⁴ La conception architecturale dans sa dimension productive est structurée sous la forme d'un processus organisé selon un ensemble de phases. Ces phases jalonnent l'évolution de la création du projet architectural en partant de la structuration des idées et de la définition du parti architectural pour arriver à la phase de construction du projet. Elles sont définies par un cadre réglementaire qui organise la production architecturale. En France, la Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 modifiée relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée définit l'ensemble des phases de déroulement du projet d'architecture ainsi que les missions qui en découlent.

(vs.construit) » (Raynaud, 2008). Philippe Boudon, appartenant à la famille des *«internalistes»*, se base sur les travaux de Simon en rapport avec la science de la conception pour fonder la notion d'*architecturologie*. Cette notion signifie la connaissance de la conception architecturale à la différence de la notion de la pratique de l'architecture. Il considère que *«la conception étant en effet, comme l'écrit Simon, "au cœur de toute formation professionnelle" l'architecture entre de plein droit dans la problématique qui est celle de Simon»* (Boudon, 1997).

Plusieurs recherches scientifiques s'intéressent à la conception architecturale dans sa dimension cognitive par analogie à d'autres domaines et particulièrement à celui de la production industrielle et du design. Ces recherches définissent trois phases majeures, une phase d'analyse du problème de conception, une autre de synthèse pendant laquelle se matérialisent et se concrétisent les idées du projet et enfin une phase d'évaluation des configurations et des solutions proposées. Ce processus général est réinterprété en différentes variantes et déclinaisons suivant l'auteur et le domaine d'étude (Porada, 1997). Dans ce contexte, Jean-Charles Lebahar (Lebahar, 1983) identifie une première phase de diagnostic architectural pendant laquelle l'architecte essaye de cerner le problème de conception en prenant en compte et en s'appropriant les différentes contraintes de conception dans leurs diversités (juridique, écologique, urbanistiques). Suit une deuxième phase de recherche de l'objet par simulation graphique où le concepteur génère des solutions et les évalue dans un processus incrémental et itératif afin d'aboutir à une solution qui satisfait, à un certain niveau, les contraintes liées aux problèmes de conception. Ce travail de recherche de solution est matérialisé par le dessin qui représente comme le décrit Lebahar, «l'objet en création et la pensée qui le crée ». La dernière phase est une phase de communication pendant laquelle l'architecte produit des représentations détaillées du projet afin d'entamer la construction du projet.

Robert Prost (Prost, 1992) propose une structure du processus de conception en architecture en quatre phases. Une première phase de formulation du problème de conception identifie les besoins et les différents contextes en rapport avec le projet. Une phase de formulation de solutions donne une ou plusieurs réponses aux problèmes de conception en prenant en compte un ensemble de référentiels. Les références sont en rapport avec le problème de conception, mais aussi avec l'architecture souhaitée. Une phase de concrétisation de solution aborde la question de la matérialisation et de la réalisation des solutions architecturales formulées. Enfin une dernière phase d'appropriation des solutions permet de comprendre et d'évaluer la pertinence sociale du projet.

Howard T.J (Howard et al., 2008) a répertorié une grande partie des méthodes caractérisant le processus de conception dans le domaine industriel durant une période qui s'étale de 1967 à 2006. Cette classification montre bien qu'il existe des similitudes dans la structuration de ces méthodes. Il a identifié quatre phases majeures. Une première phase d'analyse de tâche (*analysis of task*) qui a les mêmes objectifs que la phase de diagnostic architectural citée auparavant. Une phase de

conceptualisation (*conceptual design phase*) pendant laquelle le concepteur génère et structure des idées et des intentions par rapport au problème de conception. Une phase de matérialisation (*embodiment design phase*) où les idées et les intentions sont formalisées afin d'aboutir à des configurations architecturales vérifiant les contraintes de conception. Enfin une phase de conception détaillée (*detailed design phase*) qui permet d'affiner et de préciser la configuration architecturale proposée. Ces quatre phases sont précédées par deux phases qui ne sont pas toujours à la charge du concepteur. Une phase d'établissement des besoins (*establishing a need*) pour déterminer les besoins et le programme de conception. Une phase finale d'implémentation (*implementation phase*) portant sur la réalisation du projet (Cf. Fig 57).

Models	Establishing a need phase	Analysis of task phase	Conceptual design phase		Embodiment design phase		Detailed design phase		Implementation phase		
Booz et al. (1967)	X	New product strategy development	Idea generation	Screening & evaluation	Business analysis		Development	Testing	Commercialisation		
Archer (1968)	X	Programming : data collection	Analysis	Synthesis	Development		Communication		X		
Svensson (1974)	Need	X	Concepts	Verification	Decisions		X		Manufacture		
Wilson (1980)	Societal need	Recognize & formalize	FR's & constraints		Ideate and create		Analyze and/or test		Product, prototype, process		
Urban and Hauser (1980)	Opportunity identification	Design			Testing			Introduction : Life cycle (launch) : management			
VDI-2222 (1982)	X	Planning		Conceptual design		Embodiment design		Detail design		X	
Hubka and Eder (1982)	X	X		Conceptual design		Lay-out design		Detail design		X	
Crawford (1984)	X	Strategic planning		Concept generation		Pre-technical evaluation		Technical development		Commercialisation	
Pahl and Beitz (1984)	Task	Clarification of task		Conceptual design		Embodiment design		Detailed design		X	
French (1985)	Need	Analysis of problem		Conceptual design		Embodiment of schemes		Detailing		X	
Ray (1985)	Recognise problem	Exploration of problem	Define problem	Search for alternative proposals		Predict outcome	Test for feasible alternatives	Judge feasible alternatives	Specify solution	Implement	
Cooper (1986)	Ideation	Preliminary investigation		Detailed investigation		Development	Testing & Validation	X		Full production & market launch	
Andreasen and Hein (1987)	Recognition of need	Investigation of need		Product principle		Product design		Production preparation		Execution	
Pugh (1991)	Market	Specification		Concept design				Detail design		Manufacture : Sell	
Hales (1993)	Idea, need, proposal, brief	Task clarification		Conceptual design		Embodiment design		Detail design		X	
Baxter (1995)	Assess innovation opportunity	Possible products		Possible concepts		Possible embodiments		Possible details		New product	
Ulrich and Eppinger (1995)	X	Strategic planning		Concept development		System-level design		Detail design		Testing & refinement : Production ramp-up	
Ullman (1997)	Identify needs : Plan for the design process	Develop engineering specifications		Develop concept		Develop product				X	
BS7000 (1997)	Concept		Feasibility		Implementation (or realisation)						Termination
Black (1999)	Brief/concept	Review of 'state of the art'		Synthesis	Inspiration	Experimentation	Analysis / reflect	Synthesis	Decisions to constraints	Output : X	
Cross (2000)	X	Exploration		Generation		Evaluation		Communication		X	
Design Council (2006)	Discover	Define		Develop			Deliver			X	
Industrial Innovation Process 2006	Mission statement	Market research		Ideas phase		Concept phase		Feasibility Phase		Pre production	

Fig 57. Comparaison de modèles de processus de conception en ingénierie (Howard et al., 2008)

Herbert Simon (Simon, 2004) propose aussi une division du processus de conception en sept activités : définition (*define*), recherche (*research*), idéation (*ideate*), prototypage (*prototype*), choix (*objectives*), implémentation (*implement*) et évaluation (*learn*). Ces activités non linéaires, peuvent se répéter autant de fois qu'il le faut ou se réaliser en simultané afin de résoudre le problème de conception.

Durant ces différentes phases, le concepteur entreprend des activités de «conception-idée» et d'autres de «conception-projet» (Porada, 1997). Ces deux familles d'activités sont très liées et fortement imbriquées tout en gardant une certaine singularité avec des propriétés bien spécifiques. La première famille d'activités concerne la conception de la formulation d'une solution comme réponse à un problème posé aboutissant à une solution conçue. La deuxième famille d'activités s'intéresse plutôt à la conception de la matérialité d'une solution et à la conception des modalités de sa réalisation afin de

passer de l'état de la solution conçue à celle de la solution concrète (Prost, 1992). Ces activités traduisent les différentes actions des concepteurs durant les phases du processus de conception. Bryan Lawson (Lawson, 2006) propose une classification des activités de conception (dont la conception architecturale) en cinq groupes. Une activité de formulation (*formulating activity*) du problème de conception afin d'orienter la pensée du concepteur. Une activité de génération (*moving activity*) des idées et des intentions et leur transformation en solutions potentielles au problème de conception. Une activité d'évaluation (*evaluating activity*) des solutions et des réponses trouvées et leurs comparaisons avec les contraintes de conception. Une activité de représentation (*representing activity*) des idées, des solutions de conception permettant ainsi de les formaliser et d'aborder une première étape d'externalisation et de matérialisation. Une activité de réflexion (*reflecting activity*) présente tout au long du processus de conception mais aussi en dehors du cadre de conception afin de se construire une culture et un référentiel architectural participant d'une manière indirecte à la résolution du problème de conception (Salma Chaabouni, 2011).

Le tableau (Cf. Tab 2) révèle l'existence d'une continuité entre les résultats des différentes méthodes de classification des phases et de caractérisation des activités du processus de conception que nous avons analysé. Cette corrélation est présente au niveau du découpage des phases de conception proposée respectivement par R. Prost (Prost, 1992) et par T.J. Howard (Howard et al., 2008) ainsi qu'au niveau de l'identification des activités de conception résultant des travaux de H. Simon (Simon, 2004) et de B. Lawson (Lawson, 2006). Ce croisement de résultat permet d'établir le rapport entre les phases et les activités de conception constituent un cadre référentiel pour notre recherche.

Phases de conception (Prost, 1992)	Phases de conception (Howard et al, 2008)	Activités de conception (Simon, 2004)	Activités de conception (Lawson, 2006)
Formulation du problème	Etablissement des besoins	Définition	Formulation
	Analyse de tâches	Recherche	Représentation Réflexion
Formulation de solution	Conceptualisation	Idéation	Génération Représentation
	Matérialisation	Choix	Evaluation Réflexion
Concrétisation de solution	Conception détaillée	Prototypage	Représentation Réflexion
	Implémentation	Implémentation	
Appropriation de solution		Apprentissage	Représentation Réflexion

Tab 2. Phases de conception/activités

La conception architecturale est un processus complexe qui dépend de la disponibilité des informations concernant la tâche de conception à réaliser. Pendant les phases amont et particulièrement pendant la phase conceptuelle du processus de conception, les seules informations disponibles sont imprécises, incomplètes et de l'ordre du schématique. Par contre, ces phases sont

celles où les décisions les plus importantes doivent être prises, des décisions qui ont une influence sur le développement et l'évolution du projet. Plus les informations sont disponibles, moins elles auront d'influence sur le développement du projet (Cf. Fig 58)

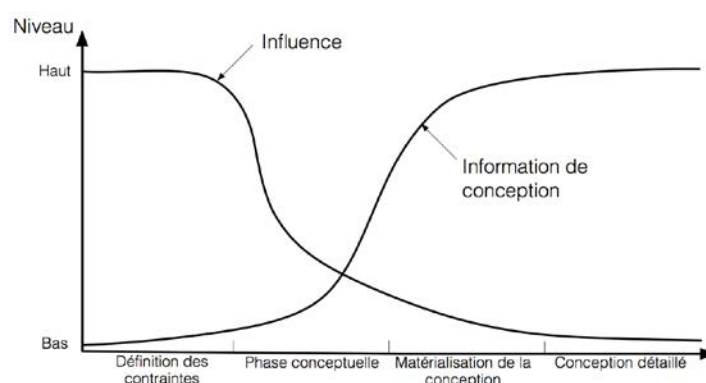


Fig 58. Progression de la disponibilité des informations et leurs influences durant les phases du processus de conception (Zeiler et al., 2007)

La quantité de connaissances autour du problème de conception augmente au fur et à mesure de l'avancement du processus, par contre le niveau de liberté de prise de décision du concepteur se réduit. Durant les phases amont les connaissances sont très réduites, par contre le niveau de liberté dans la résolution du problème de conception est très large.

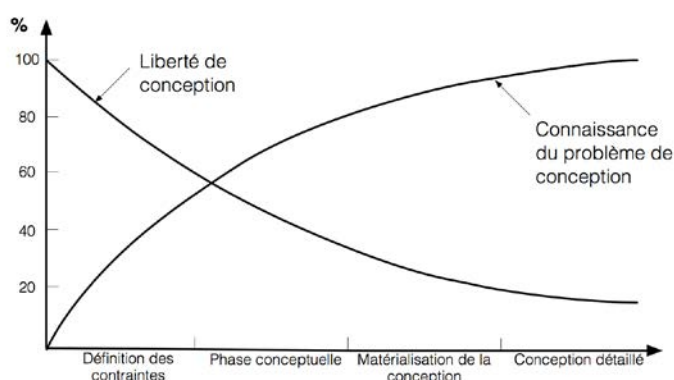


Fig 59. Progression des connaissances au tour du problème de conception par rapport à celle de la liberté de conception durant le processus de conception (Ullman, 2003)

Rappelons que le processus de conception architecturale est un processus créatif qui se base sur l'itération où les concepteurs essayent d'atténuer la contradiction entre le manque d'information et l'importance des décisions à travers la représentation. Ils utilisent différents types de représentations pour formaliser leurs idées, les évaluer et les comparer avec les contraintes de conception. Michel Conan (Conan, 1990), a répertorié les types de représentations utilisées tout au long des différentes phases du processus de conception en identifiant, pour chaque type, les objectifs et les résultats de leurs utilisations (Cf. Tab 3).

Phase de conception (Howard et al, 2008)	Types de représentations (Conan, 1990)	objectifs	Synthèses de signes utilisés	Opérations de leur production
Etablissement des besoins	Représentations programmatiques	Aider les architectes à la lecture du programme	Description du problème: verbales, organigrammes, schémas, plan existant, images référentes...	Analyse et exposition du problème
Analyse des tâches	Représentations d'exploration	Aider les architectes à s'approprier ce programme et à le reformuler en termes spéciaux	Représentation d'hypothèses: verbales, poétiques, expressions imagées, images référentes, prototypes existant, analogies, signes purement abstrait sans connexion imaginable avec un signifié, stock personnel d'éléments formels...	Formulation du programme de l'architecte: transformation de l'énoncé analytique en énoncé hypothétique, sans préoccupation de la nature exacte de la solution...
Conceptualisation	Représentations de clarification	Aider à analyser les hypothèses en adoptant des points de vue différents	Représentations analytiques: divers schémas opérationnels, plastiques, fonctionnels, symboliques, structurels...	Multiplication des hypothèses: prise de distance par rapport à la première hypothèse obtenue au moyen de son analyse à travers l'examen exhaustif des différents critères...
Matérialisation	Représentations d'élaboration du concept spatial	Aider la synthèse du parti architectural	Représentations synthétiques: combinaisons de toutes les représentations schématiques en une esquisse du travail...	Recherche de synthèse: recherche d'invariants à travers les superpositions des différents schémas (fonctionnels, plastiques, structurels...)
Conception détaillée	Représentations de perlaboration	Aider la vérification des détails au cours du développement du parti architectural	Représentations de clarification: des détails: disposition en perspectives des éléments, croquis libres, axonométries détaillées, éclatés, dessins détaillés...	Recherche de précision: servant à étudier tous les aspects essentiels et particuliers du concept spatial pour le préciser...
Implémentation	Représentations de d'exécution	Destination de communication aux entreprises	Représentations conformes aux conventions graphiques: dessins normalisés, plans, coupes...	Codage: passage à la géométrisation normalisée et codifiée de façon professionnelle...

Tab 3. Evolution des types de représentation durant les phases du processus de conception architecturale

Cette analyse et compréhension des phases et des activités qui caractérisent le processus de conception architecturale et notamment les phases amont, vont nous permettre d'identifier le rapport entre la lumière naturelle et le processus de conception architecturale. L'objectif est de répertorier les phases pendant lesquelles la lumière naturelle intervient dans le processus de genèse du projet architectural et les activités qui en découlent. Nous essayons aussi de relever les modes de représentation utilisés pour retranscrire et matérialiser la prise en compte et l'intégration de la lumière naturelle au processus de conception architecturale.

2. Prise en compte de la lumière naturelle durant le processus de conception architecturale

La prise en compte de la lumière naturelle est un phénomène complexe qui fait appel à plusieurs types d'informations en rapport avec le projet d'architecture. Ces informations ne sont pas souvent disponibles dès les premières phases du processus de conception architecturale. Cette intégration est abordée à plusieurs niveaux suivant l'état d'avancement du projet et en s'adaptant aux informations disponibles. L'objectif de cette partie est d'identifier comment les architectes abordent la complexité de prise en compte de la lumière naturelle durant les différentes phases du processus de conception architecturale⁵ ainsi que les modes de représentations utilisés.

2.1 Intégration durant la phase d'établissement des besoins et d'analyse des tâches

La question de la prise en compte de la lumière naturelle se pose dès la phase de définition du

⁵ En référence au découpage proposé par Howard et al (Howard et al., 2008)

problème de conception sous la forme de documents techniques qui déterminent les objectifs d'éclairage à respecter dans les espaces à concevoir. Ces objectifs peuvent se présenter sous la forme de quantités de lumière que le concepteur doit apporter à l'intérieur des espaces à concevoir. Ils sont l'objet de référentiels qui définissent les niveaux d'éclairage spécifiques pour chaque type d'espace. Les normes sont issues du secteur de la conception et de la construction architecturale ou bien d'autres secteurs parmi lesquels celui du travail. Ces prescriptions définissent des valeurs d'éclairage à vérifier pour chacune des fonctions de l'espace architectural. Parmi ces prescriptions, la norme européenne d'éclairagisme (NF EN 12464-1) qui définit une valeur d'éclairage à vérifier par le concepteur pour chaque type et fonction d'espace. Ainsi, une salle de classe doit vérifier un éclairage minimum de 500 lux, un indice de contrôle d'éblouissement (URG) d'une valeur maximale de 19 et un indice de rendu des couleurs (IRC) d'une valeur minimale de 80 (Cf. Tab 4).

Zones, tâches, activités	Eclairage moyen à maintenir (lux) Valeur minimale	UGR – Valeur maximale	Indice de rendu des couleurs – R _a Valeur minimale
Zone de circulation et couloirs	100	28	40
Escaliers, quai de chargement	150	25	40
Magasins, entrepôts	100	25	60
Magasins de vente, zone de vente	300	22	80
Zone de caisse	500	19	80
Espaces publics, halls d'entrée	100	22	80
Guichets	300	22	80
Restaurants, hôtels	300	22	80
Réception, caisse, concierge			
Cuisines	500	22	80
Bâtiments scolaires, salle de classe en primaire et secondaire	500	19	80
Salle de conférences	500	19	80
Salle de dessin industriel	750	16	80
Eclairage des bureaux :			
– classement	300	19	80
– dactylographie, lecture	500	19	80
– poste CAO	500	19	80
– réception	300	22	80
– archives	200	25	80

Tab 4. Normes européennes NF EN 12464-1 d'éclairagisme des lieux de travail

Ces textes et ces prescriptions constituent des contraintes que le concepteur doit prendre en compte, interpréter et essayer de satisfaire durant les phases de conception avancée.

2.2 Intégration durant la phase de conceptualisation

La lumière naturelle fait partie des thématiques abordées au moment de la déclaration des intentions. Ces intentions décrivent la manière avec laquelle le concepteur va modéliser et diriger la lumière naturelle pour éclairer, animer ou mettre en valeur ses espaces. Les intentions sont décrites de manière littérale et constituent une première forme d'externalisation des idées de conception. Elles sont ensuite retranscrites sous la forme de textes descriptifs utilisés par les concepteurs comme une première trace de la réflexion qu'ils ont portée au problème de conception.

«No Space, architecturally, is a space unless it has natural light...I am designing an art museum in Texas. Here I felt that the light in the rooms structured in concrete will have the luminosity of silver... The scheme of enclosure of the museum is a succession of cycloid vaults each of single span [100] feet long and [23] feet wide, each forming the rooms with a narrow slit to the sky, with a mirrored shape to spread naturel light on the side of the vault. This light will give a glow of silver to the room without touching the objects directly, yet give the comforting feeling of knowing the time of day.»⁶(Johnson, 1975)

Dans ce texte retranscrit, Louis Kahn retrace la genèse et le processus de formalisation de son idée d'ambiance de lumière naturelle dans les pièces du Musée d'Art de Kimbell au Texas. Il décrit le type de lumière qu'il cherche à créer en expliquant son choix d'une « *luminosité d'argent* » ainsi que le mode opératoire et la configuration architecturale qui permettra d'aboutir à ce type de lumière. Un dispositif de voûtes en béton percées d'une fente étroite ouverte sur le ciel et qui laisse passer une lumière qui sera réfléchiée par des miroirs de formes concaves sur les deux côtés de la voute. Il finit par anticiper et imaginer l'effet que donnera la lumière produite dans la pièce ainsi que sur les objets exposés (Cf. Fig 60).



Fig 60. Salle d'exposition du Musée d'Art de Kimbell au Texas, L. Kahn [site du Kimbell Art Museum]

L'analyse de ces textes révèle que la description des ambiances de lumière naturelle imaginées par les architectes est structurée sous différents aspects en rapport avec le problème de conception. Les

⁶ *Aucun espace, architecturalement, n'est un espace s'il n'a pas de lumière naturelle...Ici, j'ai eu l'intuition que la lumière reflétée sur le béton aurait la luminosité de l'argent. Le musée est couvert par une série de coques en forme de voûtes cycloïdes d'une portée de 38,78 m et d'une largeur de 7,31 m formant chacune une pièce ouverte par une fente étroite vers le ciel. La lumière naturelle est répartie sur l'intérieur des voûtes en béton par une fente réfléchissante. Cette lumière donne à la pièce l'éclat de l'argent sans toucher directement les objets exposés, mais en confortant le sentiment de connaître l'heure du jour (L'Architecture d'Aujourd'hui, 1991)*

aspects récurrents concernent le type de dispositif utilisé, la qualité des surfaces intérieures, la quantité de lumière, l'usage et le type d'effet de lumière produit. Ces aspects sont décrits en utilisant des termes spécifiques à la culture architecturale (Salma Chaabouni, 2011).

Les architectes formalisent leurs idées et leurs intentions à travers le dessin. Les dessins représentent les effets de lumière ainsi que le jeu d'ombre et de lumière imaginés par les architectes pour les espaces qu'ils conçoivent. Ils représentent aussi le parcours et le mouvement des rayons du soleil durant la période déterminée, permettant ainsi aux concepteurs de contrôler et d'adapter les besoins des espaces en lumière naturelle. Ces dessins permettent aux architectes d'externaliser leurs idées et d'aborder une première phase de « *conceptualisation graphique de la solution* architecturale » (Conan, 1990) à proposer. Les dessins utilisés appartiennent à la classe des « *dessins d'élaboration* » définie par Michel Conan. Ces derniers « *ont pour but de rechercher des propositions de solution à une partie spécifique du problème* » de conception, notamment la question des ambiances lumineuses à l'intérieur des espaces à concevoir. Ils constituent une deuxième forme de prise en compte et d'intégration de la lumière naturelle durant cette phase du processus de conception.

Les dessins, comme « *un moyen de simplifier la réalité pour illustrer une intention en allant à l'essentiel* » (Pascale, 2008), permettent au concepteur de réduire la complexité de la prise en compte de la lumière naturelle pendant des phases amont de conception. Des phases marquées par le manque et le caractère flou et imprécis des informations disponibles concernant le projet et particulièrement les aspects en rapport avec la lumière naturelle. Ils permettent de représenter les solutions architecturales et les variantes potentielles liées au problème de conception répondant ainsi à une fonction d'« énonciation ». Les dessins donnent aussi la possibilité d'évaluer et de comparer les solutions formulées, de juger leurs capacités à satisfaire les contraintes de conception et ainsi de choisir les meilleures d'entre elles. Daniel Estevez (Estevez, 2001) a identifié deux types de dessins d'intention (croquis). Le premier type est le « *croquis d'analyse* » où « *il s'agit de montrer comment un concept architectural (plastique, construction, fonction, paysage, ambiance) se concrétise dans le bâtiment observé ou projeté* ». Ce type de représentation donne plus d'importance au concept qu'au projet décrit. Le deuxième type est le « *croquis d'étude* », c'est un « *un croquis de recherche qui vise à examiner et esquisser des réponses architecturales à un programme* », qui correspond à une activité de « *simulation graphique* » permettant d'évaluer les solutions formulées afin de faire des choix (Cf. Fig 61).

Campo Baeza utilise le dessin comme moyen pour formaliser l'importance qu'il apporte à la prise en compte de la lumière naturelle et l'importance qu'elle prend dans la genèse de ses projets. Ses dessins représentent le rapport de continuité entre la forme spatiale et le type de lumière qui caractérise ses projets. Ils montrent la manière avec laquelle il anticipe le comportement lumineux des espaces qu'il est en train de concevoir, ainsi que les différents moyens qu'il met en place pour aboutir à ses objectifs.

Ses dessins reflètent aussi le travail de recherche, d'itération et d'évaluation qu'il entreprend pour aboutir à une configuration architecturale vérifiant ses intentions de lumière naturelle.

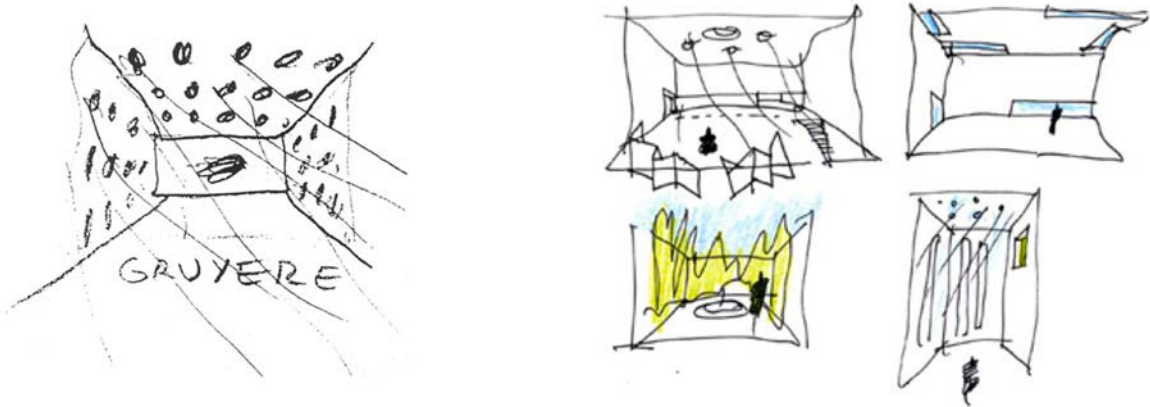


Fig 61. Croquis d'analyse (gauche) / Croquis d'études (droite) dessinés par Campo Baeza [Site officiel de Campo Baeza]

2.3 Intégration durant la phase de matérialisation

A ce stade du processus de conception, le concepteur a déjà fixé le parti architectural structurant son projet. Il dispose d'un ensemble d'informations permettant d'aborder la question de la concrétisation des idées et des concepts qu'il a mis en place durant la phase de conceptualisation, et de leur confrontation avec la réalité matérielle de l'architecture. La question de la prise en compte des ambiances de lumière naturelle est moins complexe puisque le concepteur possède un ensemble d'informations qui lui permettent de construire des modèles réduits. Ceux-ci constituent une interprétation matérielle à faible niveau de détail des propositions conceptuelles du concepteur pour visualiser la propagation de la lumière naturelle et son mouvement à différents moments de la journée. La visualisation et l'évaluation du comportement lumineux résultant sont des méthodes de validation des hypothèses posées lors de la formulation des intentions, aidant ainsi le concepteur à choisir entre différentes solutions possibles aux problèmes de conception. Cette phase offre une certaine souplesse et une liberté d'action permettant aux concepteurs d'entreprendre facilement des corrections et des modifications des caractéristiques du projet pour affiner son comportement et l'adapter à leurs intentions (Cf. Fig 62).

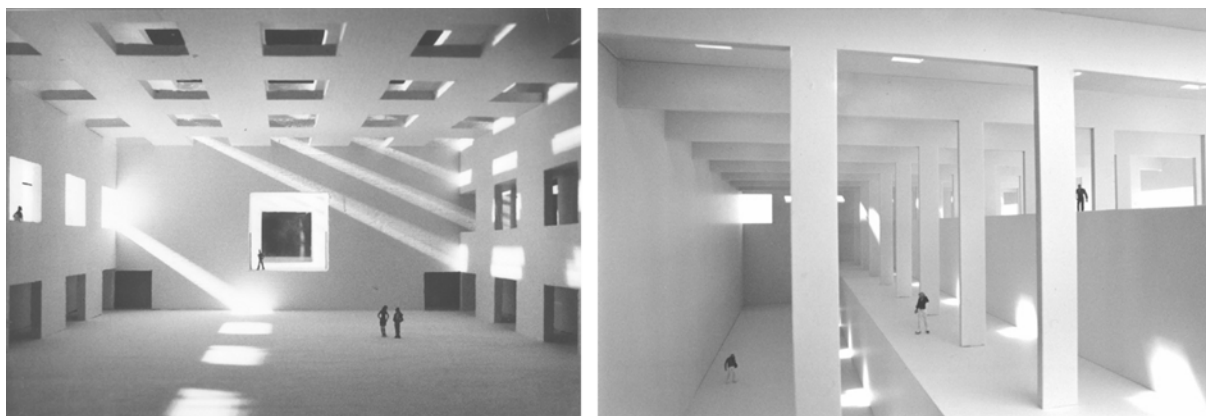


Fig 62. Maquettes d'études des effets lumineux/Campo Baeza [site officiel de Campo Baeza]

2.4 Intégration durant la phase de conception détaillée

La phase de conception détaillée est une phase de finalisation de la conception du projet. Elle est caractérisée par des informations détaillées et portant sur différents aspects du projet. Ces informations permettent la mise en place de modèles précis dédiés à l'étude et à l'expérimentation de la lumière naturelle par des outils de simulation. Les architectes font appel aux logiciels de simulation pour l'étude du comportement de la lumière naturelle dans leurs projets. Ce nouveau mode de travail est le résultat du développement des outils numériques et de leur adaptation à la pratique architecturale. Les outils de simulation numériques donnent la possibilité d'évaluer, avant la construction du projet, la quantité et la qualité de la lumière naturelle qui sera disponible dans les espaces projetés. Le but est de tester différents aspects en relation avec le projet comme les configurations architecturales, les dispositifs d'éclairage et les propriétés des matériaux. Ensuite, il faut évaluer les résultats obtenus et les comparer aux contraintes de conception afin d'apporter des changements et des ajustements pouvant améliorer la qualité et le rendement lumineux des espaces à concevoir. Ces modèles numériques peuvent être transformés, remodelés et corrigés à tout moment. Ils permettent au concepteur d'entreprendre des modifications et des corrections d'une manière plus facile et plus rapide que sur les modèles physiques favorisant ainsi leur utilisation dans le cadre de projet de conception (Cf. Fig 63).

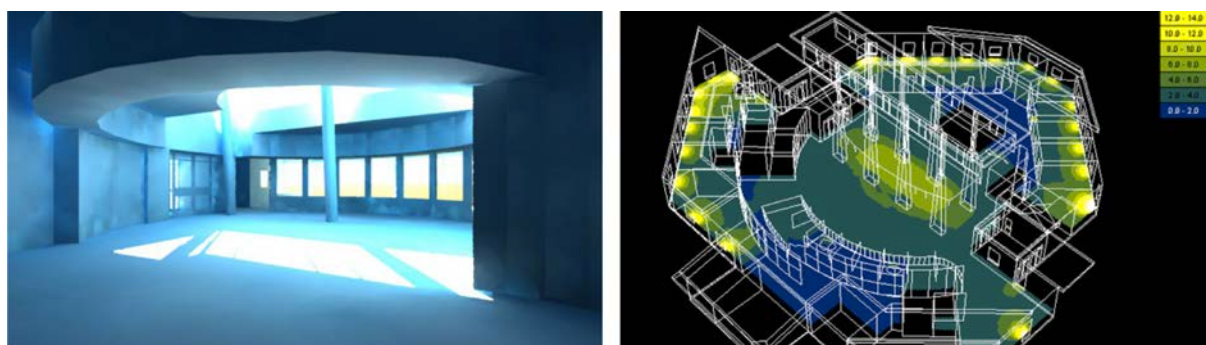


Fig 63. Simulation photo-réaliste/simulation des FLJ [site officiel de Prairie Architectes INC]

2.5 Caractérisation de l'intégration de la lumière naturelle dans le processus de conception architecturale

L'analyse des différents niveaux et formes de représentations de la prise en compte de la lumière naturelle dans la conception architecturale révèle que l'esquisse constitue une première formulation des réponses à la question de l'intégration de la lumière naturelle pendant la phase de conceptualisation. Cette phase est caractérisée par une multiplicité des contraintes de conception (les intentions du concepteur et les exigences du projet), une incertitude et une imprécision des informations disponibles. En revanche, les modèles de simulation numériques ou physiques sont utilisés durant les phases avancées de conception. Ces phases sont caractérisées par une disponibilité d'informations détaillées permettant la réalisation et l'étude du comportement lumineux de ces modèles, réduisant ainsi l'incertitude qui caractérise de la prise en compte de la lumière naturelle. Le croisement des résultats de ces analyses montre que, d'un côté, les formes de représentation de l'intérêt et de la prise en compte de la lumière naturelle évoluent tout au long des différentes phases de conception. Elles deviennent de plus en plus précises et certaines en passant du texte d'intention, à l'esquisse et finalement au modèle numérique détaillé (Cf. Fig 64). D'un autre côté, la multiplicité des contraintes liées à l'intégration de la lumière naturelle diminue suivant l'avancement des phases du processus de conception architecturale grâce à la disponibilité d'informations de plus en plus précises et certaines. Enfin, la disponibilité des informations précises résultant de la prise de décision et de la fixation de certains aspects du projet réduit la marge de manœuvre du concepteur qui se limite à des justifications et des corrections très légères.

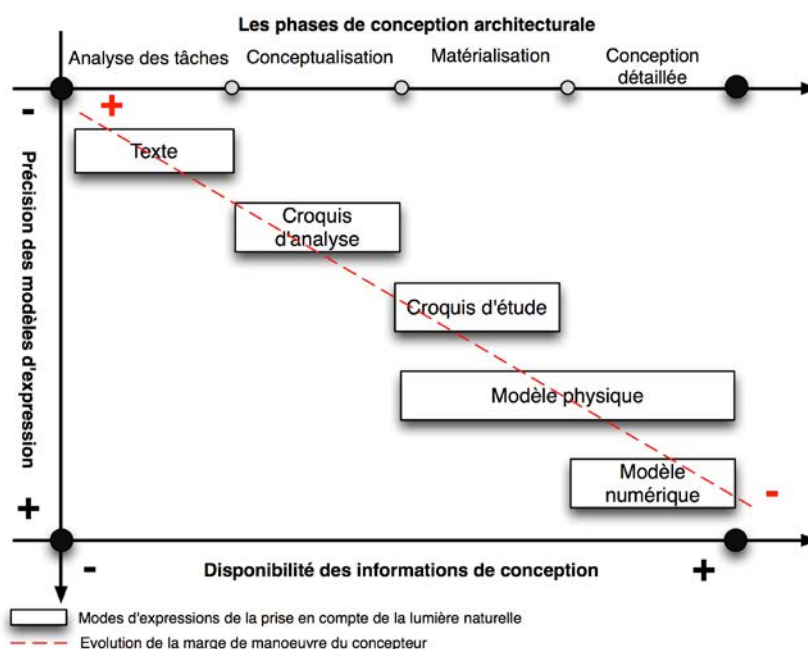


Fig 64. Caractérisation de la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases du processus de conception architecturale.

À partir de ces constatations, nous supposons qu'une intégration progressive de la lumière naturelle dès les phases conceptuelles du projet permet au concepteur de matérialiser ses intentions malgré la multiplicité, l'imprécision et l'incertitude qui les caractérisent. Cette intégration progressive nécessite l'intervention de méthode et d'outils d'assistance qui s'adaptent aux différentes phases et particulièrement les phases conceptuelles.

3. Synthèse

La première partie de ce mémoire s'est intéressé à la conception architecturale en temps que processus organisé en phases et intégrant un ensemble d'activités de conception. L'identification et la caractérisation de ces phases ainsi que leurs activités sont le résultat d'un travail d'analyse et de comparaison de recherches scientifiques portant sur l'organisation de l'activité de conception industrielle et architecturale. Cette introduction a permis d'aborder la question de structuration du rapport entre la lumière naturelle et le processus de conception architecturale. Nous avons essayé de mettre en évidence les différentes facettes de la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases de conception. Nous avons aussi porté un intérêt particulier aux différentes formes d'expression de cet intérêt ainsi que son évolution tout au long des phases de conception.

Nous avons dégagé les notions d'incertitude, d'imprécision et de multiplicité qui caractérisent l'intégration de la lumière naturelle dans la conception architecturale et les différents niveaux qu'elle prend en fonction des phases du processus de conception.

Ce résultat dirige notre attention vers les activités d'assistance à la conception appliquées à la lumière naturelle et son rapport à la conception architecturale. Il sera question de mettre en évidence la nature des besoins d'assistance et les différentes réponses apportées particulièrement pendant les phases amont de conception.

Chapitre IV. Nature des méthodes et des outils d'assistance à la conception

Le travail d'analyse de la première partie a permis de mettre en évidence le rapport entre la lumière naturelle et l'architecture et en particulier la place de la lumière dans l'activité de conception architecturale. Nous avons essayé tout d'abord d'identifier et de décrire les formes de participation de la lumière naturelle aux différentes phases qui caractérisent le processus de conception. Dans un deuxième volet, notre attention s'est dirigée vers les paramètres qui régissent la relation entre la lumière naturelle, comme phénomène physique éphémère, et l'espace architectural, comme phénomène matériel permanent. De cette étude, nous avons pu illustrer la complexité qui caractérise à la fois, la maîtrise du comportement lumineux en architecture et la prise en compte la lumière naturelle dans les premières phases du processus de conception architecturale.

Alors, comment réduire cette complexité, par quels moyens peut-on aider le concepteur et particulièrement le jeune concepteur à dépasser cette complexité et à maîtriser le comportement lumineux dans ses projets dès les premières esquisses ? Pour répondre à cette question, nous porterons notre attention sur les méthodes et les outils d'assistances dédiées à l'architecture d'une manière globale tout en ciblant celles qui s'intéressent à la lumière naturelle. Enfin, nous mettons en évidence les avantages et les faiblesses de ces différentes méthodes. Nous chercherons à identifier la capacité des méthodes identifiées à s'adapter aux exigences des phases conceptuelles du projet afin de proposer des pistes pour le développement et la mise en œuvre d'une nouvelle méthode d'assistance.

Ces méthodes et outils ont des approches différentes divisées en trois grandes familles :

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

Ce chapitre caractérise ces trois familles en identifiant les modèles manipulés, les fonctions qu'elles proposent dans le but de construire une connaissance de ces familles de méthodes et des outils d'assistance à la conception architecturale.

1. Les supports d'assistance exploitant les références

1.1 Les documents de références

Le concepteur a besoin régulièrement de trouver et d'analyser des exemples qui lui suggèrent des solutions théoriques et concrètes aux contraintes de conception qu'il rencontre. Le besoin d'assistance se traduit par la recherche de références ou de traces d'expériences traitant des contraintes et des questionnements posés aux concepteurs et proposant des règles de conception ou des solutions à suivre pour atteindre un objectif. Ces supports représentent aussi un ensemble de projets considérés comme des modèles à suivre et dont le concepteur essaye de leur attribuer une valeur référentielle (Cf. Fig 65).

«Vitruve, détenteur de l'autorité, objet d'étude nécessaire, référent obligatoire de tout travail architectural (théorique et appliqué), tel est bien le credo de tous.» (Choay, 1996)⁷

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



Fig 65. Différentes formes de références : Les dix livres d'architecture de Vitruve (Vitruve, 1684) / Entretiens sur l'architecture d'Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc (Viollet-Le-Duc, 1863) / Vers une Architecture/LeCorbusier (Corbusier, 1923) / S, M, L, XL/Rem Koolhaas et Bruce Mau (Koolhaas, Mau, 1997)

⁷ Le procès-verbal de la première séance régulière de l'Académie d'architecture, tenue à Paris le 4 février 1672, énonce exemplairement la valeur référentielle de ce livre que l'Académie lira et relira jusqu'au milieu de la Révolution « Ayant été mis en délibération quelle est l'autorité de Vitruve et quels sentiments l'on doit avoir de sa doctrine, tous ont été d'avis qu'il faut le considérer comme le premier et le plus sçavant de tous les architectes et qu'il doit avoir la principale autorité parmy eux. Que, pour le fait de sa doctrine, elle est admirable en gros et à suivre sans s'en départir, aussy bien que dans la meilleur partie du détail, dont il sera fait le discernement par l'assemblée dans son temps. » (Choay, 1996)

1.2 Les outils d'exploration de références

Nous assistons actuellement à un mouvement de numérisation et de virtualisation des références architecturales des ambiances lumineuses. Ces références prennent la forme d'images représentant des effets de lumière naturelle accompagnées d'attributs donnant des informations complémentaires facilitant la lecture et l'interprétation de la référence (nom du projet, architecte, localisation, contexte social, type de dispositif d'ouverture). Le mouvement de numérisation s'est matérialisé par la mise en place d'outils de parcours et d'exploration de base de données de références. Ces outils sont classés en deux catégories selon le type de fonction qu'ils proposent. La première catégorie d'outils offre des fonctions de recherche, de navigation et d'identification de références ciblée à partir d'une base constituée principalement d'images et d'attributs sémantiques. Ces images peuvent être issues de projets réels ou de simulations photo-réalistes. La deuxième catégorie intègre les outils de référencement typologique qui proposent des fonctions de parcours de base de référence associée à des opérateurs de combinaison et d'association des références sélectionnées par l'utilisateur pour en générer de nouvelles. Cette deuxième catégorie d'outil fait appel à des images de format normalisé (taille, couleurs, contenu) neutre de toute connotation historique, culturelle, environnementale qui peut influencer et perturber la lecture et l'interprétation de la référence. Ces images focalisent exclusivement sur l'objet d'étude à savoir la lumière naturelle en représentant un dispositif architectural et l'effet qu'il produit.

« En se dégageant du caractère circonstanciel des modèles historiques, l'approche typologique permet en effet de mieux poser le problème de l'articulation entre les différents points de vue pouvant participer à la lecture et à l'évaluation des "effets" ou "performance" d'un dispositif architectural » (Lassance, 1998).

Selon Guilherme Lassance (Lassance, 1998), la définition du dispositif architectural fait appel à deux notions : la morphologie spatiale et le dispositif d'éclairage. La première notion de morphologie spatiale regroupe quatre paramètres : la forme géométrique de l'espace, les proportions spatiales, l'échelle, le degré d'ouverture-fermeture. La variation de la valeur de ces paramètres permet de définir une typologie spatiale (Cf. Fig 66). Ainsi, la morphologie spatiale d'une « *unité spatiale* » peut être caractérisée par une forme de type « *cubique* », des proportions de type « *centralité* », une échelle de type « *individuelle* » et un degré d'ouverture de type « *fermé* ».

La deuxième notion de dispositif d'éclairage est définie comme étant l'unité qui regroupe la fonction de transmission (type de surface vitrée) et de contrôle des apports lumineux par le type d'ouverture, les dimensions, la situation. La variation de ces paramètres permet de constituer une typologie de dispositif d'éclairage (Cf. Fig 66). Cette typologie caractérise « *l'entité dispositive* » constituée d'un ou de plusieurs percements et leurs paramètres pour définir un objet référant reconnaissable en tant

que tel à savoir un type d'ouverture. Ainsi une ouverture de type « *occulus* » est caractérisée par une position « *centré* », un matériau « *transparent* » et une position « *zénithale* ».

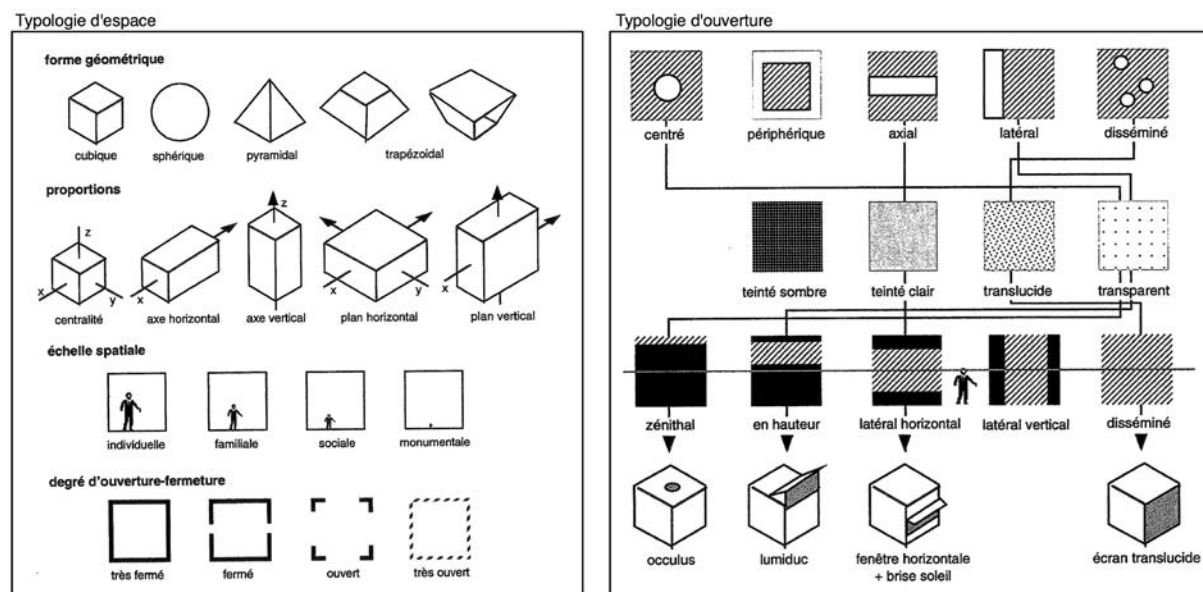


Fig 66. Définition et caractérisation des typologies d'espace et d'ouverture selon Guilherm Lassance (Lassance, 1998)

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

À partir de ces modes de navigations et des sélections, le concepteur peut construire des albums d'images. La zone de dessin donne la possibilité à l'utilisateur d'intégrer des images sélectionnées afin de les annoter et de dessiner des croquis d'intentions. La boussole oriente le mode de navigation de la base en focalisant sur un aspect particulier du rapport entre lumière naturelle et architecture. La sélection de la position « *effet* » de la boussole favorise la dimension sensible de la lumière naturelle au moment de l'exploration des références. Ces dessins représentent les intentions du concepteur constituées et formalisées à partir de la navigation dans la base de références (Cf. Fig 67).

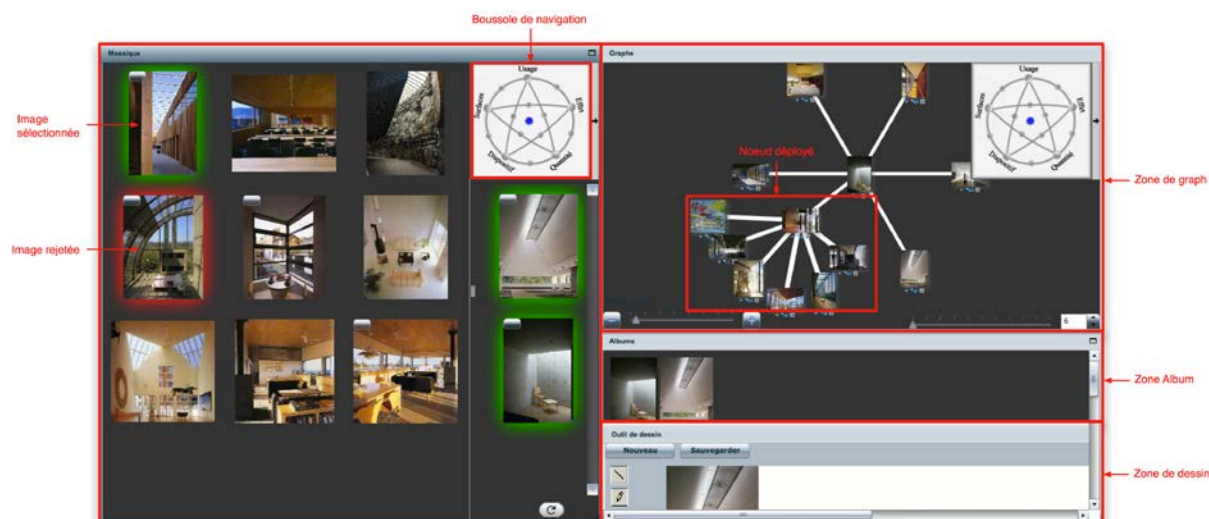


Fig 67. Interface de Day@mbiance (Salma Chaabouni, 2011)

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

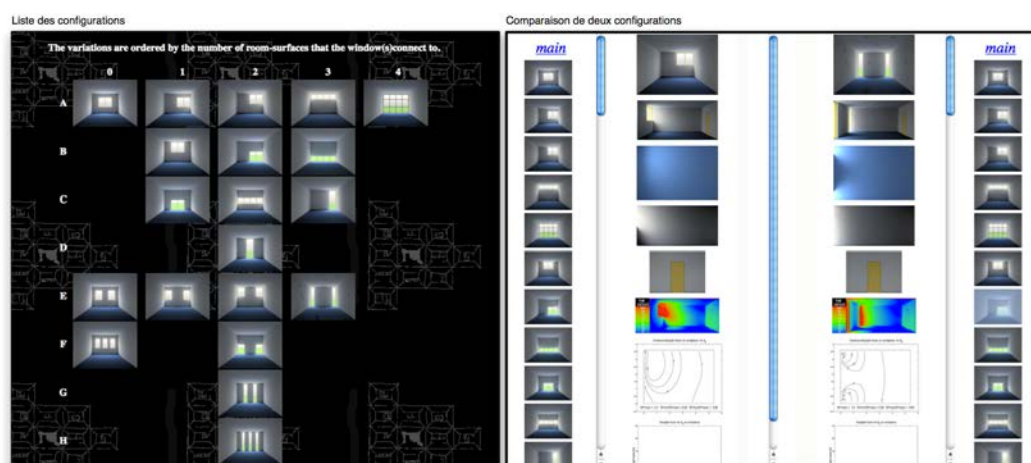


Fig 68. Interface et fonctions de "Daylight Design Variation Book" (Diepens et al., 2000)

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

«En conception l'approche typologique permet d'aborder de nouvelles problématiques en pleine connaissance des précédents similaires» (Demers, 1997b)

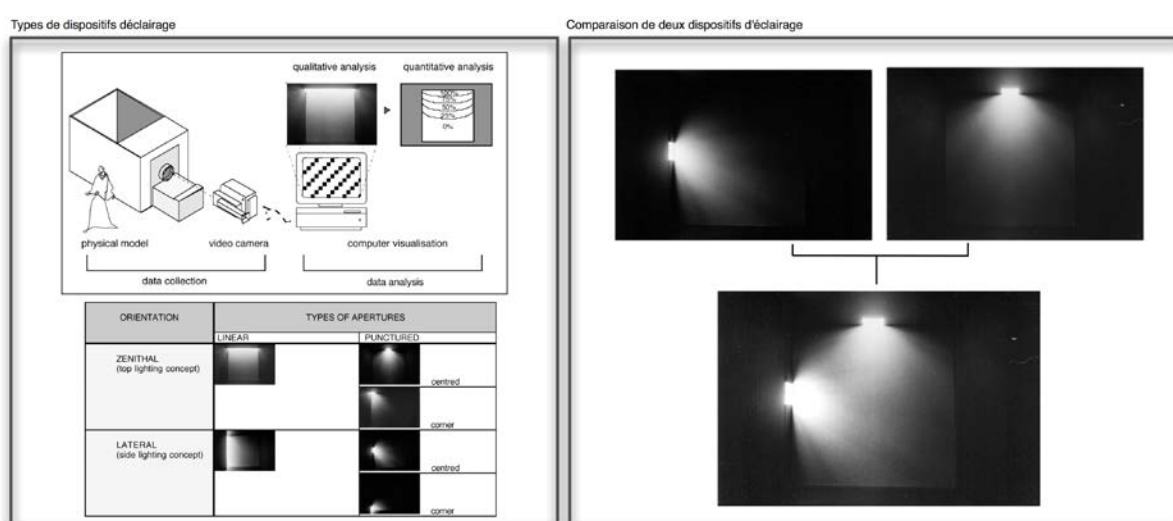


Fig 69. Méthode de création et de combinaison d'effets de lumière naturelle à partir d'images de référence (Demers, 2000)

1.3 Les manuels techniques

L'évolution des contraintes techniques en rapport avec l'architecture a donné lieu à un besoin d'assistance plus ciblé vers des champs de compétences plus techniques et très précises. Ce besoin a donné naissance à des manuels de conception qui constituent une interprétation et une simplification des règles techniques, des lois physiques et des méthodes de calculs appliquées à la conception architecturale (Cf. Fig 70). Ils sont souvent organisés sous deux volets, un premier théorique intégrant des connaissances physiques autour de l'origine, des sources, du comportement, de la quantification et de la qualification de la lumière et un deuxième, plus pratique et appliqué à l'architecture. Ce volet présente des évaluations de cas d'études de configurations architecturales et des interprétations aidant le concepteur à choisir et à dimensionner les dispositifs d'éclairage adaptés à leurs projets.



Fig 70. Manuels de conception : Daylight design of buildings / Nick Baker et Koen Steemers (Baker, K. A. Steemers, 2002) / L'éclairage naturel des bâtiments/Sigrid Reiter et André De Herde (Reiter, De Herde, 2004) / Construire avec la lumière naturelle / Marc Fontoynt, Michel Perraudau, Pascale Avouac et Jean-Marc Lauby (Fontoynt et al., 2011)

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

1.4 Les abaques de représentation et de calcul

Les abaques sont une forme d'interprétation pratique et appliquée des connaissances théoriques de la quantification (calcul de FLJ) et de qualification des apports solaires (tracé des ombres). Ce support d'assistance de type abaque fait appel à des techniques de construction et de représentation graphique permettent de donner une réponse au besoin d'anticiper et de maîtriser le comportement de la lumière naturelle pour un bâtiment projeté. « Elles mettent à profit les propriétés géométriques des différents diagrammes solaires » pour proposer une représentation des tracés des ombres d'une configuration spatiale donnée ainsi que le tracé des masques et l'évaluation des périodes d'ensoleillement en un point déterminé (Siret, 1997). Le premier type d'abaques permet de définir graphiquement le tracé des ombres propres ou portées d'un volume à une date et à un horaire bien précis déterminant la direction des rayons solaires. Ces derniers sont obtenus à travers différents types de diagrammes solaires. Ils offrent plusieurs niveaux de simplification de la construction géométrique des rayons de soleil. Parmi ces derniers le gnomon ou le diagramme MT qui permettent de représenter le tracé des ombres portées par simple report des hauteurs (Cf. Fig 71) (Siret, 1997). L'utilisation de ce type de méthode d'évaluation fait appel à une construction géométrique complexe et un temps d'exécution conséquent

qui demeure difficilement intégrable à un processus de conception itératif enchainant des activités de création, d'évaluation et de modification.

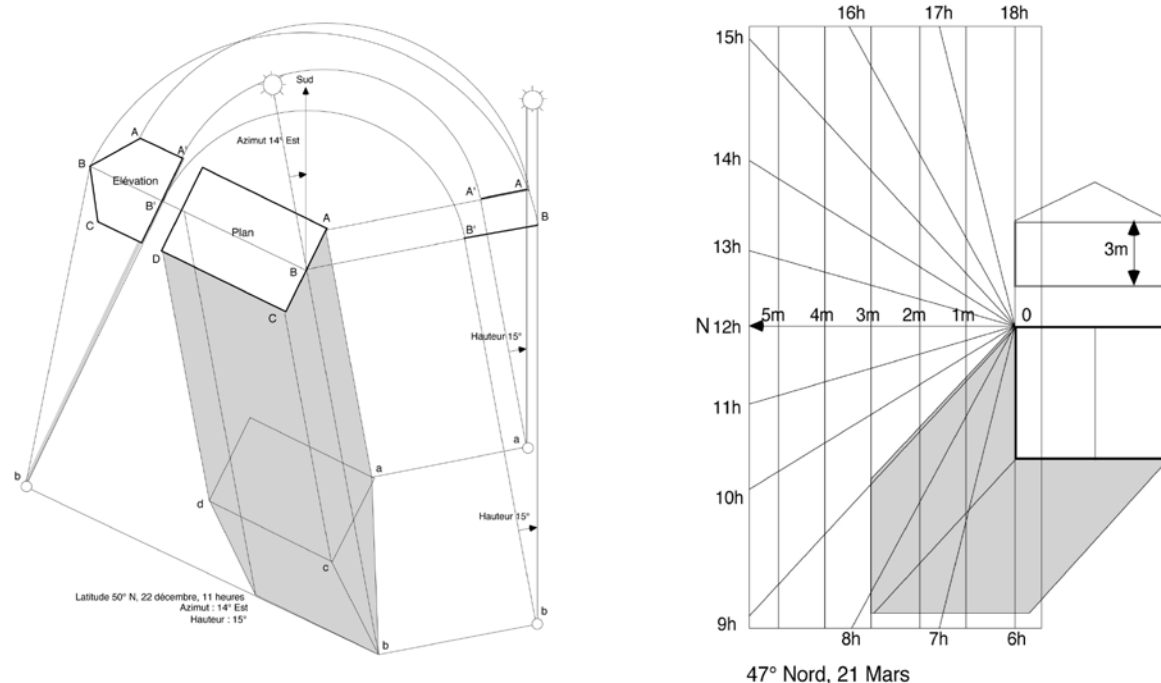


Fig 71. Exemples d'abaques graphiques : tracé des ombres portées en dessin géométral (gauche) et à l'aide du diagramme solaire MT (droite) (Siret, 1997)

Le deuxième type d'abaque porte sur la dimension quantitative de la lumière naturelle. Il s'agit d'une interprétation des équations complexes de calcul des apports lumineux sous la forme de feuilles de calcul. *LUMcalcul*[®] (Demers, Potvin, 2004) est un abaque de calcul du Facteur de lumière du Jour réalisé par Claude MH Demers à partir des équations de Peter Tregenza et de David Loe (Tregenza, Loe, 1998) établies pour déterminer la valeur des *FLJ* d'espaces intérieurs sous des conditions d'éclairage de type ciel couvert. Cet abaque est développé sous le format d'une feuille de calcul *Excel* qui garantit une accessibilité et une simplicité d'utilisation pour un public constitué principalement d'architectes.

LUMcalcul[®] offre la possibilité de la saisie des valeurs d'entrées (dimension des ouvertures, facteur de réflexion des parois et facteur de transmission du vitrage) et le calcul des fonctions afin de donner des évaluations rapides du comportement lumineux des propositions architecturales étudiées (*FLJ* et éclairement). Les paramètres d'entrées sont détaillés, interprétés sous la forme de graphiques et accompagnés de bulles d'explications. Ceci permet de simplifier la détermination et la saisie des valeurs attribuées aux paramètres d'entrées. Les résultats sont calculés immédiatement et représentés sous la forme de valeurs numériques (valeur de facteur de lumière du jour moyen), graphiques

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



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels
École d'architecture

LUMcalcul 2.08©

Prédiction de la lumière naturelle
pour les étapes conceptuelles du design architectural

Cette feuille de calcul du Facteur Lumière du Jour a été élaborée par Claude MH Demers à partir des équations de David Loe publiées dans "The design of lighting" (1988), E&F Spon, London and New York. Elle est distribuée à titre didactif. Lorsque pertinent, des références de G.Z. Brown et M. De Kay de "Sun, wind and light" (2002), John Wiley and Sons, N.Y., 2002, sont ajoutées pour expliciter certaines données ou résultats.
Pour toute suggestion visant son amélioration, n'hésitez pas à contacter l'auteur: claudio.demers@arc.ulaval.ca

Identification du projet

Localisation: latitude

Particularité environnementale

Espace spécifique étudié

Symboles

Un commentaire est ajouté aux cases marquées d'un triangle rouge

Ces cases doivent obligatoirement être remplies ou mises à jour.

Cases utilisées pour des éléments aux caractéristiques différentes d'une même variable.

Cases sont activées d'un menu déroulant. Veuillez sélectionner l'élément de votre choix.

1. Description des surfaces

Transparence (fenêtres et ouvertures sur l'extérieur)

Description des surfaces transparentes selon l'orientation

Eclairage latéral: surfaces transparentes selon l'orientation

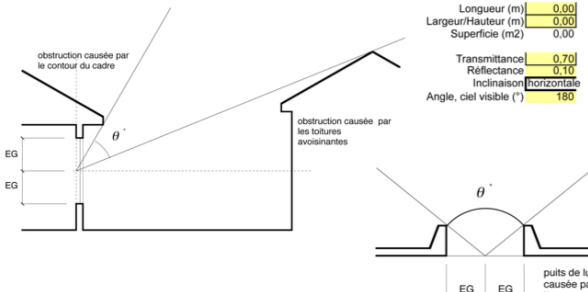
	Nord	Sud	Est	Ouest
1. Largeur (m)	0.00	4.00	0.00	0.00
Hauteur (m)	0.00	4.00	0.00	0.00
Superficie (m2)	0.00	16.00	0.00	0.00
Transmittance	0.70	0.70	0.70	0.70
Réflexance	0.10	0.10	0.10	0.10
Inclinaison	vertical	vertical	vertical	vertical
Angle ciel visible (°)	90	90	90	90

	Nord	Sud	Est	Ouest
2. Largeur (m)	0.00	0.00	0.00	0.00
Hauteur (m)	0.00	0.00	0.00	0.00
Superficie (m2)	0.00	0.00	0.00	0.00
Transmittance	0.00	0.00	0.00	0.00
Réflexance	0.00	0.00	0.00	0.00
Inclinaison	vertical	vertical	vertical	vertical
Angle ciel visible (°)	0	0	0	0

Aires totales (m2)

Eclairage zénithal: puits de lumière

	type 1	type 2
Longueur (m)	0.00	0.00
Largeur/Hauteur (m)	0.00	0.00
Superficie (m2)	0.00	0.00
Transmittance	0.70	0.70
Réflexance	0.10	0.10
Inclinaison	horizontale	horizontale
Angle, ciel visible (°)	180	180



2. Variables utilisées dans le calcul du Facteur lumière du jour (FLJ) moyen

Aire majorée des éléments de transparence A_s

Eclairage latéral (m2)

Eclairage zénithal (m2)

Latéral+zénithal (m2)

Obstructions par cadre et membrures

Aire totale des surfaces de l'espace (m2) A

Angle ciel visible moyen (°) θ

Réflexance moyenne des surfaces de l'espace ρ

Surfaces verticales: Nord 0.80, Sud 0.10, Est 0.80, Ouest 0.80

Surfaces horizontales: plafond 0.80, plancher 0.80

Transmittance résultante du verre T

Transmittance moyenne du verre

Facteur d'entretien

Rapport aires verre zénithal/latéral

Volume total de l'espace m3

Rapport transparence/volume de l'espace

Équation du FLJ (De Tregenza & Loe)

$$\bar{D} = \frac{A_s}{A} \frac{\theta \tau}{(1 - \rho_2)}$$

3. Facteur lumière du jour (FLJ) résultant

Condition ACTUELLE calculée

Facteur lumière du jour moyen

Attention: les gains thermiques pourraient être élevés.

L'éclairage de cet espace serait qualifié de brillant

La contribution à l'éclairage naturel serait très bonne

En principe, un éclairage électrique ne serait pas nécessaire

Pourcentage d'ouvertures (latéral+zénithal)

Pourcentage d'ouvertures (latéral seulement)

Condition ALTERNATIVE

Calcul de la surface vitrée nécessaire à l'obtention d'un FLJ souhaité

FLJ souhaité

Aire d'ouvertures requise pour l'obtention du FLJ souhaité m2

Pourcentage d'ouvertures (toutes surfaces)

Pourcentage de vitrage (assumant une seule façade vitrée). Choisir l'orientation:

Nord	Sud	Est	Ouest
0.32%	0.32%	0.32%	0.32%

Fig 72. Interface de la feuille de calcul LUMcalcul[®] (Demers, Potvin, 2004)

2. Supports d'assistance exploitant les modèles physiques

Cette forme d'assistance repose sur l'utilisation du modèle réduit ou maquette qui se traduit par la construction tridimensionnelle fidèle à la réalité matérielle d'une œuvre projetée à travers laquelle le concepteur évalue la validité et la solidité de sa proposition. La maquette est le premier type de modèle physique utilisé pour assister le concepteur dans sa démarche de conception. Elle met en place une première confrontation du projet avec la réalité physique à une échelle réduite et avec des degrés différents de simplification. Cette confrontation permet d'évaluer la capacité du projet à répondre à différents types de contraintes. Ces contraintes peuvent être en rapport avec les préférences ou les goûts esthétiques et volumétriques imposées par le maître d'ouvrage. Elles concernent l'intégration et l'insertion du projet dans son environnement naturel et urbain. Les maquettes constituent aussi pour les architectes un moyen de communication sur leur démarche et leurs choix de conception (Cf. Fig 73).

L'évolution de la conception architecturale a donné lieu à des projets et des formes complexes produisant une nouvelle génération de contraintes techniques plus complexes. Des exigences qui concernent la stabilité structurelle, la résistance à des facteurs environnementaux (écoulement d'eau, chute de neige, mouvement d'air), le comportement aérodynamique et lumineux des projets conçus. Ces nouvelles contraintes ont attribué une nouvelle fonction à la maquette qui devient alors un support à l'étude expérimentale en laboratoire. Dans ce contexte, la maquette du projet du Centre Pompidou de Metz a fait l'objet d'un test climatique réalisé dans la soufflerie Jules Verne du CSTB⁸ de Nantes. Cette étude a porté sur l'évaluation du comportement de la couverture et de la structure de la façade du centre face aux sollicitations du vent et aux charges de neige. Le résultat de cette étude expérimentale a permis de définir le coefficient de chargement de la toiture du projet en cas de chute de neige selon une direction et une vitesse de vent précise.



Fig 73. Exemples de maquettes : maquette Hôtel Dieu de Beaune, France, maquette en paille du XVIIIème / Le Corbusier et la maquette de la Villa Savoye, France, 1928 / maquettes d'études du Centre Pompidou de Metz, France, 2006

⁸ Centre scientifique et technique du bâtiment

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

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



Fig 74. Le Model 126 Heliodon - Texas A&M's College of Architecture / Le ciel artificiel - Université Laval / Le SkyDome - The Welch School of Architecture

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

Les maquettes physiques sont faciles à manipuler et constitue un objet maîtrisé et apprécié par les architectes. En revanche, elles demandent un temps de préparation assez conséquent avec un usage souvent unique et des possibilités de modification très limitées. Le prototypage rapide exploitant les nouvelles fonctions de découpage et de maquetage numérique peut apporter des solutions favorisant

l'utilisation de la maquette physique. En effet, les imprimantes 3D ainsi que les machines à découpe laser apportent un gain en terme de temps d'exécution et de précision pour la réalisation des maquettes et particulièrement celles de formes complexes et celles destinées à des études physiques avancées.

Les maquettes physiques à usage d'évaluation doivent vérifier un niveau de correspondance à la réalité de l'objet modélisé et aux contraintes d'utilisation du dispositif d'évaluation. Ainsi, une maquette à utiliser dans ciel artificiel doit être construite à une échelle précise prenant en compte les dimensions du dispositif d'évaluation (la boîte de ciel artificiel), des capteurs mesures à intégrer dans la maquette et des appareils de prise de vues. Elle doit être construite avec des matériaux qui vérifient les propriétés de l'objet réel. Ainsi, l'acrylique d'une épaisseur de 3 mm d'épaisseur et d'un facteur de transmission de 92% peut être utilisé pour la modélisation des dispositifs d'éclairage constitués de verre simple et clair (Cf. Fig 75).

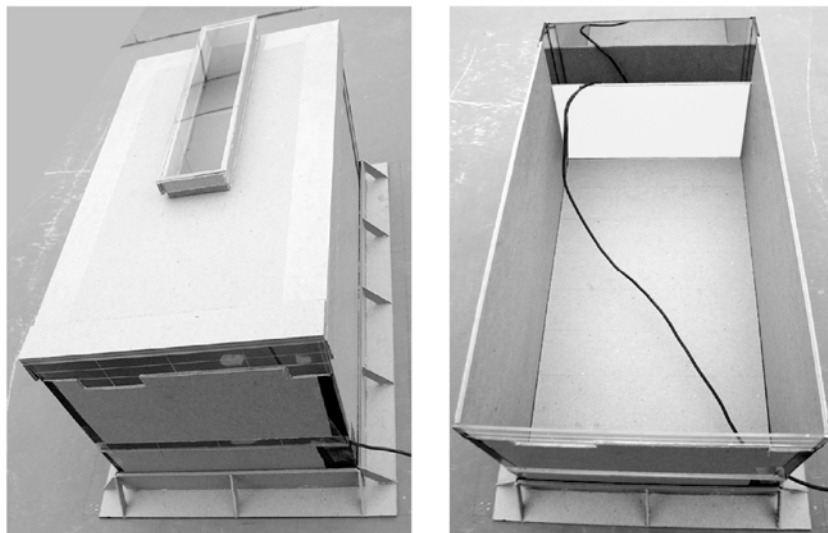


Fig 75. Intérieur d'une maquette utilisée pour un ciel artificiel (facteur de réflexion du mur de fond 80% et le reste des parois 50% - taux de transmission du vitrage 92%)

L'apport des dispositifs d'évaluation utilisant les maquettes physiques reste limité à cause de différents facteurs. Le premier est un facteur économique à cause de la charge financière que constituent l'achat et l'utilisation de ce type matériel (héliodons, soufflerie, imprimante 3D). Ce facteur limite l'utilisation de ce type de support d'assistance à des organismes et à des projets de grande échelle. Le deuxième facteur est d'ordre technique dû à la complexité de configuration et de mise en œuvre de ce type de dispositif limitant ainsi l'utilisation de cette technologie à un public d'initiés. Leurs usages sont limités par le facteur d'échelle des maquettes et le nombre limité de types d'évaluations possibles.

3. Supports d'assistance exploitant les modèles numériques

L'évolution qu'a connue la production architecturale au cours du 20^{ème} siècle a donné naissance à une nouvelle génération de contraintes liées à : la gestion des problèmes techniques, la production des saisies des documents techniques et au respect des normes de sécurité. L'évolution de l'expression architecturale elle-même a donné lieu également à de nouvelles contraintes résultant de la genèse de formes architecturales de plus en plus complexes. Les architectes et globalement les concepteurs ont cherché des méthodes et des outils qui leur permettent d'intégrer ces contraintes le plus facilement et le plus rapidement possible, un besoin qui a dynamisé l'évolution et le développement des systèmes informatisés qui caractérisent cette époque. Il existe différents modèles numériques dont les fonctions et les objectifs ont évolué suivant les besoins des concepteurs et le développement des technologies modernes. Cette partie a pour objectif de classer et de caractériser ces méthodes et outils exploitants des modèles numériques en mettant en relief leur apport dans la maîtrise et le contrôle du comportement de la lumière naturelle.

3.1 Supports d'assistance utilisant des modèles numériques géométriques (2D et 3D)

3.1.a Les modèles numériques géométriques

Les modèles numériques de représentation géométrique sont des modèles de représentation de connaissances géométriques de niveau d'abstraction et de complexité variable. Ce niveau d'abstraction varie selon les propriétés et des contraintes qui caractérisent l'objet à modéliser, alors que le niveau d'abstraction dépend de l'usage et des activités auquel le modèle doit répondre. Ainsi, un modèle numérique de représentation 2D est le résultat de la modélisation d'entités géométriques de faible niveau de complexité sur le plan (X,Y) : un point, une ligne (segment, droite), une courbe. Le niveau de complexité augmente avec les modèles de représentation géométrique 3D d'où il est question de modéliser et donner une forme abstraite à des entités géométriques dans l'espace (X,Y,Z) : surface, volume surfacique, solide. La représentation d'objet géométrique de type surfaces gauches non régulières fait appel à des familles d'entités géométriques complexes comme celle des *NURBS* (*Non-Uniform Rational Basis Splines*) qui permettent de représenter des formes libres à travers des surfaces délimitées par des courbes.

Le choix d'un modèle de représentation numérique est défini selon un ensemble de critères (Hégon, 2003) :

- La capacité de représentation morphologique et structurelle d'un objet : choisir un modèle selon le type d'objets qu'on cherche à représenter ;

- La capacité de représentation visuelle : choix d'un modèle selon son niveau de précision et de réalisme de représentation ainsi que sa vitesse d'exécution (particulièrement pour le calcul des rendus photo-réalistes) ;
- Le mode d'acquisition des données géométrique de l'objet à modéliser : choix selon le procédé d'acquisition des données utilisée pour modéliser l'objet géométrique. Ce procédé peut être sous la forme d'une interface de commande interactive, un langage de description ou à partir de données numérisées (à partir d'images ou de captures lasers) ;
- Le type d'utilisation du modèle créé : le type d'usage de l'objet géométrique créé permet de définir le choix de type de modèle géométrique à utiliser. Un objet géométrique destiné à la simulation du comportement thermique est différent d'un objet géométrique utilisé pour la simulation du comportement lumineux.

Ces critères permettent de définir trois familles de modèles numériques de représentation géométrique :

- Modèles de représentations adaptées à la création interactive qui intègre les modèles de type arbre de construction (les approches *CSG – Constructive Solid Geometry*, modèles d'assemblage de primitives solides géométriques à l'aide d'opérateurs d'union, d'intersection et de différence) et les modèles de balayage (ensemble de points balayé par un objet qui se déplace tout au long d'une trajectoire) ;
- Modèles performants pour la visualisation : intègre les modèles de représentation par frontière (l'objet est représenté par son enveloppe décrite comme un assemblage de morceaux de surfaces planes ou gauches) ;
- Modèles pour des traitements divers : intègre les modèles de type arbre de construction et énumération spatiale (calcul des propriétés physiques et réalisation d'opérations booléennes entre objets).

3.1.b Modèle géométrique impératif

Les méthodes d'assistance utilisent des modèles numériques géométriques pour proposer aux concepteurs une aide pour optimiser le temps de préparation et de traitement des documents graphiques représentant le projet.

Cette assistance porte sur la représentation bidimensionnelle (2D) des pièces graphiques du projet (plan, coupe, façade, détail technique) ainsi que la représentation tridimensionnelle (3D) des volumes du projet donnant naissance à la notion de maquette numérique. La maquette numérique est ainsi une représentation virtuelle réalisée à partir des propriétés géométriques de l'objet conçu. Les activités de construction de la maquette numérique font appel à un vocabulaire et une syntaxe géométrique lui attribuant le caractère impératif. Les maquettes physiques et numériques partagent la même propriété

où « *la vérification a priori de l'objet conçu ne pose que sur l'expertise et l'expérience du concepteur. Leur vérification sur le modèle obtenu ne peut s'opérer qu'a posteriori* » (Hégon, 2003). En revanche, à la différence de la maquette physique qui est figée, la maquette numérique est dynamique, ouverte à toute évolution ou modification et répondant à des besoins d'études sensibles (rendu photo-réaliste, insertion en milieu urbain et naturel) et physiques (évaluation de comportements physiques). La maquette numérique évolue avec le projet et offre la possibilité de garder une trace des différentes mutations survenues tout au long du processus de conception du projet.

Parmi les logiciels d'aide à la représentation géométrique, on peut citer *Autocad®* et *Sketchup®* (Cf. Fig 76). Ces derniers sont structurés selon des modèles numériques de représentation géométrique 2D et 3D. Trois niveaux de différence caractérisent ces deux logiciels. Le premier concerne le type et le nombre d'entités géométriques gérées par chaque logiciel. Le deuxième niveau de différence porte sur les fonctions de modélisation (les fonctions qui gèrent les propriétés des entités et les relations entre elles) qu'ils proposent et leur degré d'adaptation aux exigences de la pratique de la conception architecturale. Enfin, un troisième niveau de différence qui porte sur les modes de visualisation et le temps d'exécution des opérations de modélisation ou d'affichage. Ainsi, *sketchup®* propose une interface et des outils de modélisation qui simplifie la saisie des données de construction de modèles 3D optimisés pour la représentation d'objets architecturaux. Il offre des fonctions de modification et de correction (découpage et extrusion de faces) du modèle construit qui crée un potentiel d'accompagnement les activités itératives de conception.

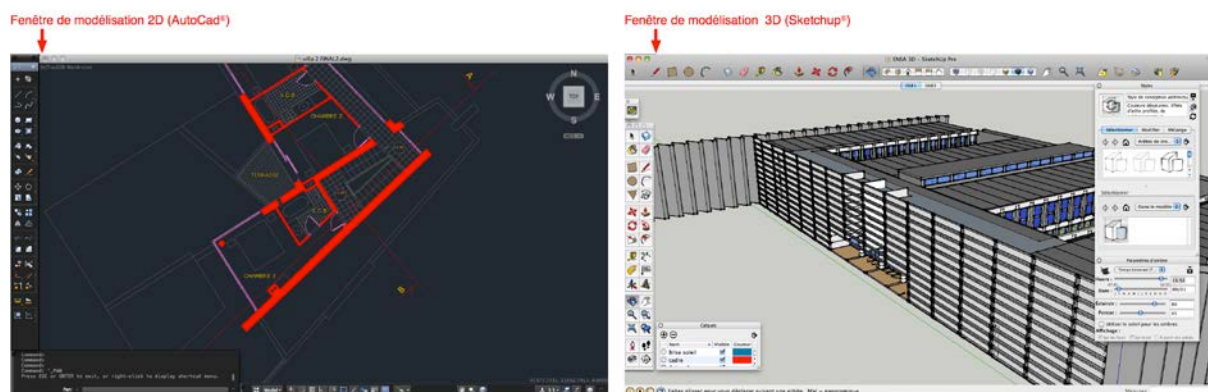


Fig 76. outils de représentation 2D et 3D utilisant un modèle numérique géométrique (AutoCad® et Sktechup®)

3.1.c Modèle géométrique paramétrique

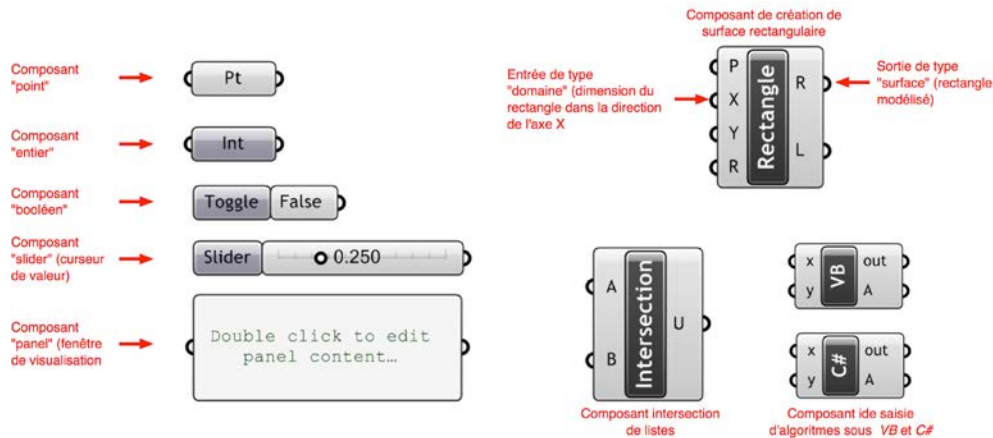
Ce type de support permet de modéliser un objet à partir de ses propres propriétés (non géométriques) qui sont ensuite traduites par des données et des contraintes géométriques. La création d'un modèle de représentation géométrique d'un objet architectural commence par identifier les paramètres qui le caractérisent. Ensuite, il est question de définir le type et le domaine de variation des valeurs potentielles de ces paramètres. Finalement, les paramètres identifiés sont traduits en propriétés géométriques dont la représentation sera assurée par les modèles numériques de représentation

géométrique. Le modèle paramétrique est l'algorithme responsable de la caractérisation et la traduction des paramètres en données géométriques. Ce type de support permet la création de bibliothèques d'objets paramétrés pour modéliser des objets architecturaux (existant et patrimoniaux), de mobilier ou de structure.

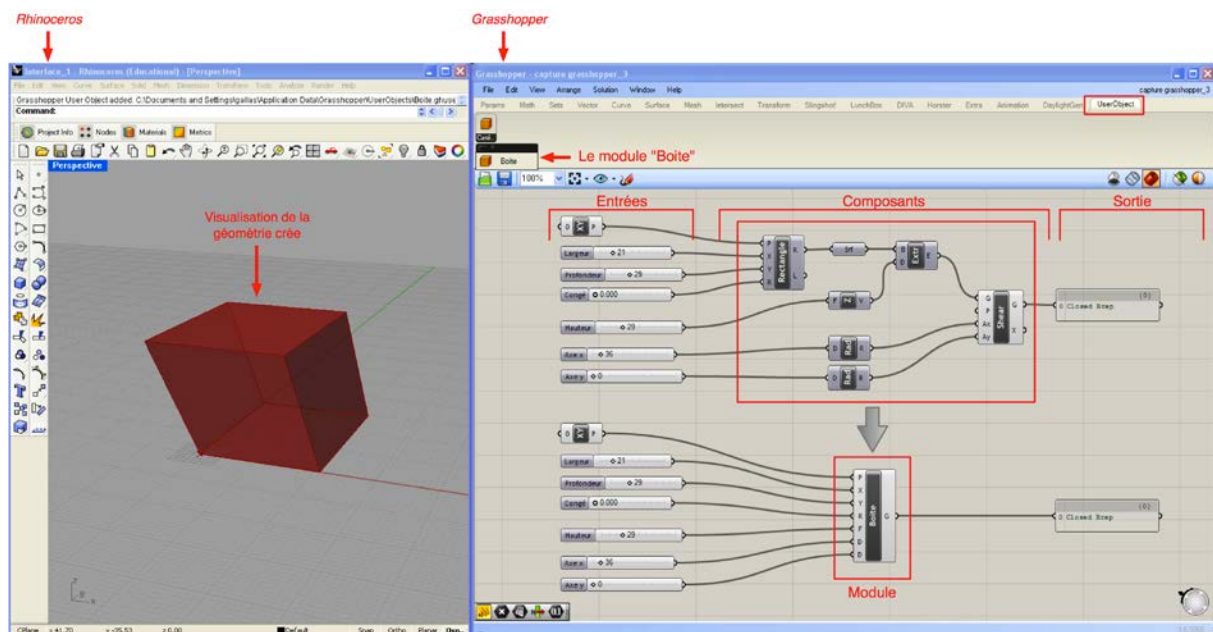
La dimension paramétrique offre des possibilités d'exploration et d'évaluation plus riches que celles des supports de représentation géométrique impérative comme l'explique Christine Chevrier (Chevrier et al., 2009) « *Les paramètres de ces divers objets peuvent se voir affecter des valeurs interchangeables, transformant ainsi la morphologie de l'entité ; la modification itérative des valeurs permet la génération de tout un ensemble de variantes, à des fins exploratoires. Le concepteur dispose ainsi d'un outil d'investigation lui permettant d'explorer les multiples configurations pouvant être générées à partir de l'objet de base.* ». Cette dimension exploratoire s'adapte aux activités de recherche et d'évaluation successives qui caractérisent le processus de conception architecturale.

Les algorithmes structurant le modèle paramétrique sont associés aux logiciels de modélisation géométrique. Ce type d'algorithme peut être implémenté sous la forme de plug-in faisant appel à des langages de programmation de type C++ ou des langage propres au logiciel de modélisation MEL (*Maya Embedded Language*). Parmi ces derniers on peut citer le modèle de génération d'objets paramétrique du patrimoine GOP réalisé sous le langage de programmation C++ et Mel et une interface d'utilisation et de visualisation sous le logiciel de modélisation Maya®. Il existe aussi des algorithmes de modélisation paramétrique qui utilisent un langage de programmation graphique permettant à l'utilisateur de créer ces propres modèles paramétriques d'une manière intuitive. Ce type d'algorithme est associé à des logiciels de modélisation géométrique exploitant leurs fonctions de visualisation et leurs opérateurs géométriques. Parmi ces éditeurs d'algorithmes graphiques on peut citer Grasshopper® et le logiciel de modélisation Rhinoceros® développe par Robert McNeel & Associates® ou bien Dynamo® et logiciel de modélisation Revit Architecture® développé par Autodesk®.

Un éditeur d'algorithmes graphiques comme Grasshopper® (Tedeschi, 2011) dispose de fenêtre de travail sur laquelle des composants sont positionnés. Ces composants graphiques intègrent des algorithmes de définition d'entités géométrique, d'opérations de transformation géométrique, d'opérations logiques, de données d'entrées et de résultats (logiques et géométrique). Chaque composant possède des entrées et des sorties auxquelles d'autres composants peuvent se connecter constituant ainsi un flux continu d'informations. Les entrées de type numérique peuvent être définies à travers le composant « Slider ». Ce composant crée un domaine de variation de valeurs numériques de type entier ou réel avec une interface permettant à l'utilisateur ou à un algorithme génératif de déplacer la position d'un curseur changeant ainsi la valeur du paramètre.



Le résultat des opérations effectuées par les composants est affiché sur les fenêtres de visualisation du modelleur 3D *Rhinos*[®]. Ce type d'éditeur intègre des composants de saisie et de définition d'algorithmes sous le format de ligne de codes utilisant des langages de programmation de type *C#*, *VB*[®] (*Visual Basic*) ou *Python*[®]. Un ensemble de composants peut être rassemblé et encapsulé dans un seul module appelé « *Cluster* ». Ce dernier permet de réduire la taille d'affichage des algorithmes réalisés sous *Grasshopper*[®], de les structurer et de les rendre moins complexes. L'utilisateur a la possibilité d'enregistrer le cluster dans une bibliothèque personnelle de modules appelés « *User object* » afin de les réutiliser pour la création d'autre algorithme.



Ce type d'éditeur d'algorithme offre une interface d'utilisation et un environnement de travail qui s'adaptent aux besoins d'utilisateur de type architecte qui n'ont pas les connaissances nécessaires pour l'utilisation de langage et d'environnement de programmation classique (ligne de code). Il permet ainsi aux concepteurs de mettre ne place des méthodes d'exploration et de recherche de configurations architecturales, urbaines ou structurelles à partir de la définition de modèles paramétriques.

3.1.d Modèle géométrique sémantique

Une géométrie sémantique est un modèle géométrique qui attribue à l'objet géométrique une dimension sémantique. La dimension sémantique porte sur des domaines de connaissances autres que géométriques qui peuvent être temporels, historiques, culturels, techniques ou sociétales. Les modèles géométriques sémantiques ont donné naissance au concept de *BIM* (*Building Information Modeling*). Le concept de BIM donne une structure pour les modèles géométriques sémantiques organisée selon trois aspects ; la géométrie, les relations et les attributs (Hichri et al., 2013). Le premier aspect concerne la modélisation géométrique de l'objet faisant appel à un modèle numérique géométrique pour créer les entités géométriques qui composent l'objet. Le deuxième aspect concerne les relations qui existent entre les différentes entités géométriques qui composent l'objet (hiérarchie, positions). Finalement, le troisième aspect décrit les attributs des entités géométriques : les catégories d'objets (porte, ouverture), les matériaux (texture, couche de compositions), durée de réalisation (date prévue de début et de fin d'exécution), cycle de vie (cycle d'entretien, date de remplacement).

Les logiciels intégrant le concept de *BIM* utilisent des formats d'échange normalisés, comme le standard IFC⁹, permettant de communiquer et de partager les maquettes numériques de bâtiments entre différents logiciels et différents acteurs du secteur du bâtiment (architectes, ingénieurs, entreprises, économistes). *Revit Architecture*[®] est un logiciel de modélisation géométrique sémantique structuré selon le concept de *BIM* développé par *Autodesk*[®]. Ce logiciel intègre un modèle numérique géométrique paramétrique orienté architecture permettant la génération d'entités géométriques de type : mur, porte. Ces entités sont caractérisées par le modèle sémantique en leur attribuant des propriétés en rapport avec le domaine de la construction. L'interface de *Revit Architecture*[®] présente deux familles de fenêtres de visualisation : une première pour la modélisation géométrique et une deuxième pour la modélisation sémantique.

⁹ Le format IFC (Information For Construction) est un format de fichier orienté objet utilisé par l'industrie du bâtiment pour échanger et partager des informations entre logiciels.

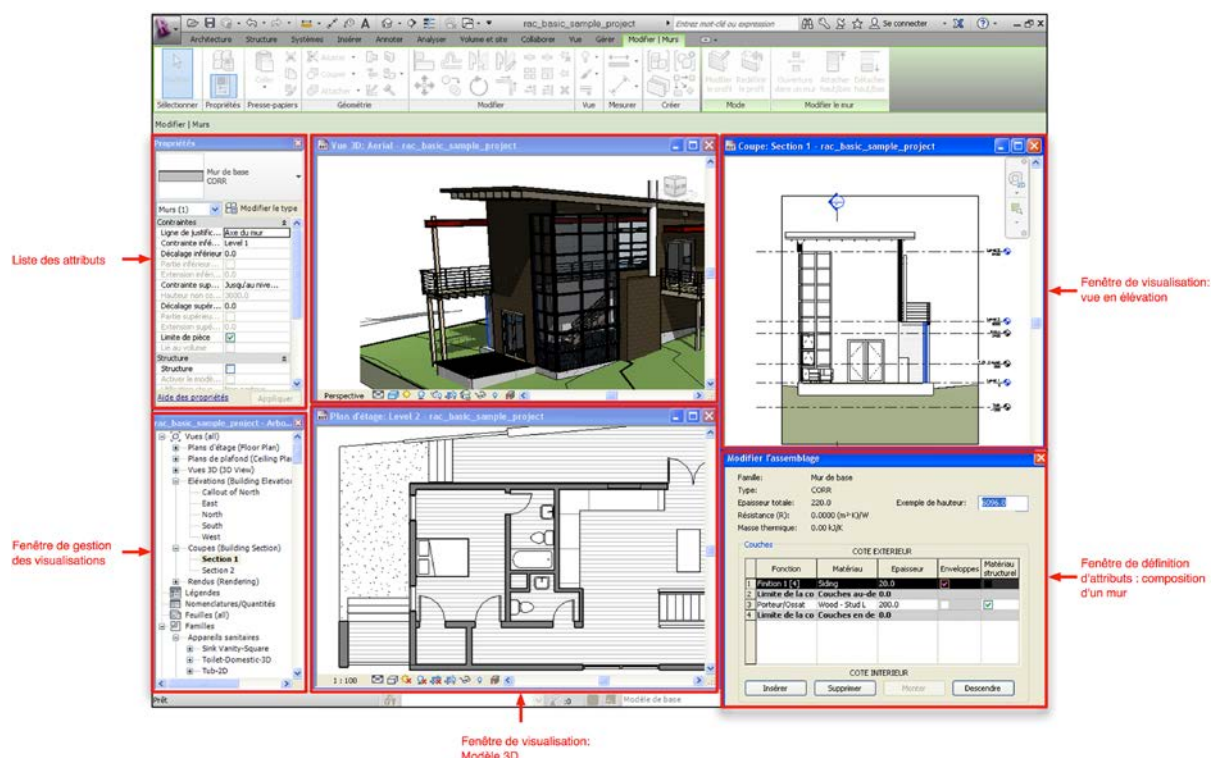


Fig 77. Exemple de logiciel de BIM (Revit®)

3.1.e Supports de modélisation géométrique déclarative

La modélisation déclarative consiste à modéliser un objet à partir d'une description de ses propriétés intrinsèques et des effets qu'il peut produire. Selon Gérard Hégron (Hégron, 2003), « *ces propriétés font appel à trois niveaux de modélisation* :

- *La forme de l'objet (modèle géométrique)*
- *Les phénomènes naturels avec lesquels interagira l'objet à concevoir (modèles physiques et comportementaux)*
- *La perception de l'objet dans son contexte (modèle perceptif) »*

Le processus de modélisation déclarative est structuré selon trois phases majeures. La première phase dite de description est une étape de saisie des différentes propriétés qui caractérisent l'objet à générer. La deuxième étape est celle de la génération pendant laquelle la description est interprétée en solutions. Enfin, la troisième étape de prise de connaissances permet de présenter les résultats de la génération pour que l'utilisateur puisse choisir la ou les solutions correspondant à ses attentes.

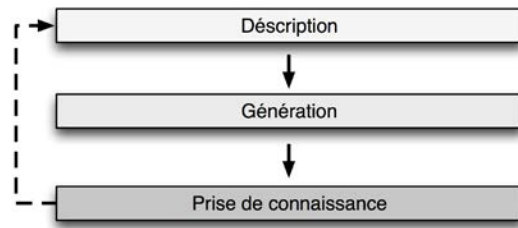


Fig 78. Structure du processus de modélisation déclarative

Le modèle physique assure la transcription des données de description non géométrique en données exploitées par le modèle numérique géométrique pour proposer une ou plusieurs formes possibles vérifiant la description faite au début. Ces réponses sont visualisées et mise dans leur contexte d'étude grâce au modèle de perception.

La modélisation déclarative offre une forme de description des objets qui peut porter sur des dimensions autres que géométriques plus sensibles et perceptibles. Cette forme de description peut être utilisée pour décrire des intentions de concepteur caractérisé par leur aspect flou, imprécis et sensible. Le potentiel de description est associé à un potentiel d'exploration et de recherche de solutions en qui peut être intégré dans un contexte de conception architecturale comme l'explique Georgios Bardis (Bardis, 2006) « *La méthodologie de Modélisation Déclarative offre au concepteur la possibilité de décrire un objet ou un environnement en utilisant des termes abstraits, au lieu des valeurs explicites pour des propriétés géométriques concrètes. L'avantage principal de cette approche, particulièrement pendant la première phase de conception, est de permettre au concepteur de se concentrer sur des caractéristiques qui sont plus près de l'intuition humaine.*

Wordseye[®] (Coyne, Sproat, 2002) est un outil de modélisation géométrique qui fait appel à un processus de déclaratif. Il permet de générer des scènes composées d'objets tridimensionnels à partir d'une description textuelle des types d'entités géométriques (cube, pyramide, arbre), leurs propriétés (couleur, dimension) et les relations qui lient ces entités. Cet outil fait appel à un modèle de connaissance géométrique qui identifie les entités décrites. Le modèle géométrique crée les entités géométriques de la scène 3D qui respecte la description du début du processus. Cette scène tridimensionnelle est affichée par le modèle de visualisation qui offre des fonctions de navigation (Cf. Fig 79).

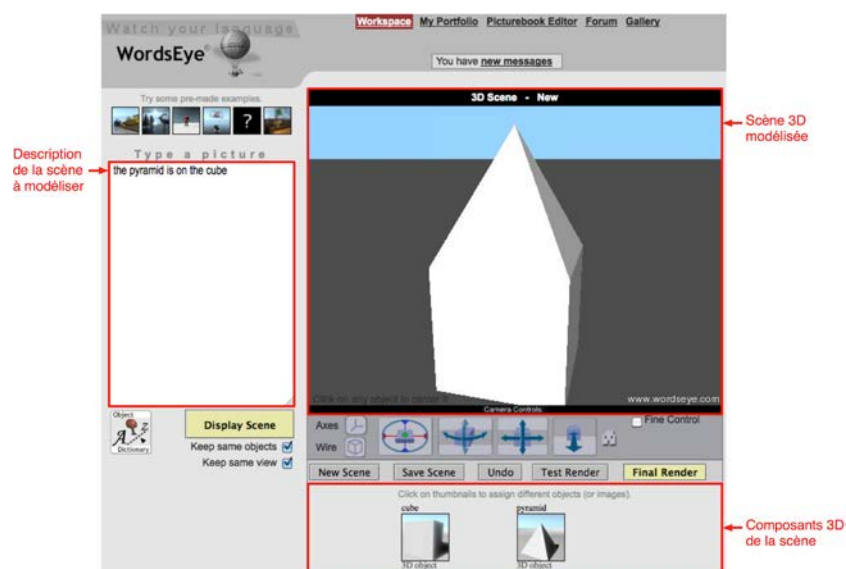


Fig 79. Processus de modélisation déclaratif proposé par Wordseye® (Coyne, Sproat, 2002)

La modélisation déclarative propose un cheminement de l'effet en cherchant la cause. Selon Gérard Hégron « *les intentions du concepteur représentent l'énoncé du problème c'est-à-dire le cahier des charges ou des spécifications de l'objet à créer. Ses intentions ne portent pas directement sur la forme de l'objet à concevoir, mais décrivent ses propriétés intrinsèques et les effets qu'il doit produire.* » (Hégron, 2003). Cet effet peut porter sur un domaine physique comme celui du comportement lumineux et être décrit d'une manière quantitative.

Dans ce contexte Daniel Siret (Siret, 1997) propose l'outil « *Solimac* » qui dispose d'une interface où l'utilisateur peut décrire un objectif d'éclaircissement matérialisé par une tache solaire de forme rectangulaire. Cette tache est contextualisée en définissant une localisation dans le temps et dans l'espace. Le modèle déclaratif traduit la description de la quantité d'apports lumineux et leur localisation dans l'espace en une entité géométrique appelé pyramide d'ensoleillement. Cette activité de traduction fait appel à un modèle de connaissance physique du comportement de la lumière naturelle. Le modèle géométrique calcule l'intersection entre la pyramide d'ensoleillement et la forme géométrique de l'espace de base. Ce processus génère une géométrie brute qui nécessite un traitement. Ce traitement consiste à donner une forme architecturale (ouverture, baie, auvent, brise soleil) des entités géométriques issues de l'opération d'intersection (Cf. Fig 80).

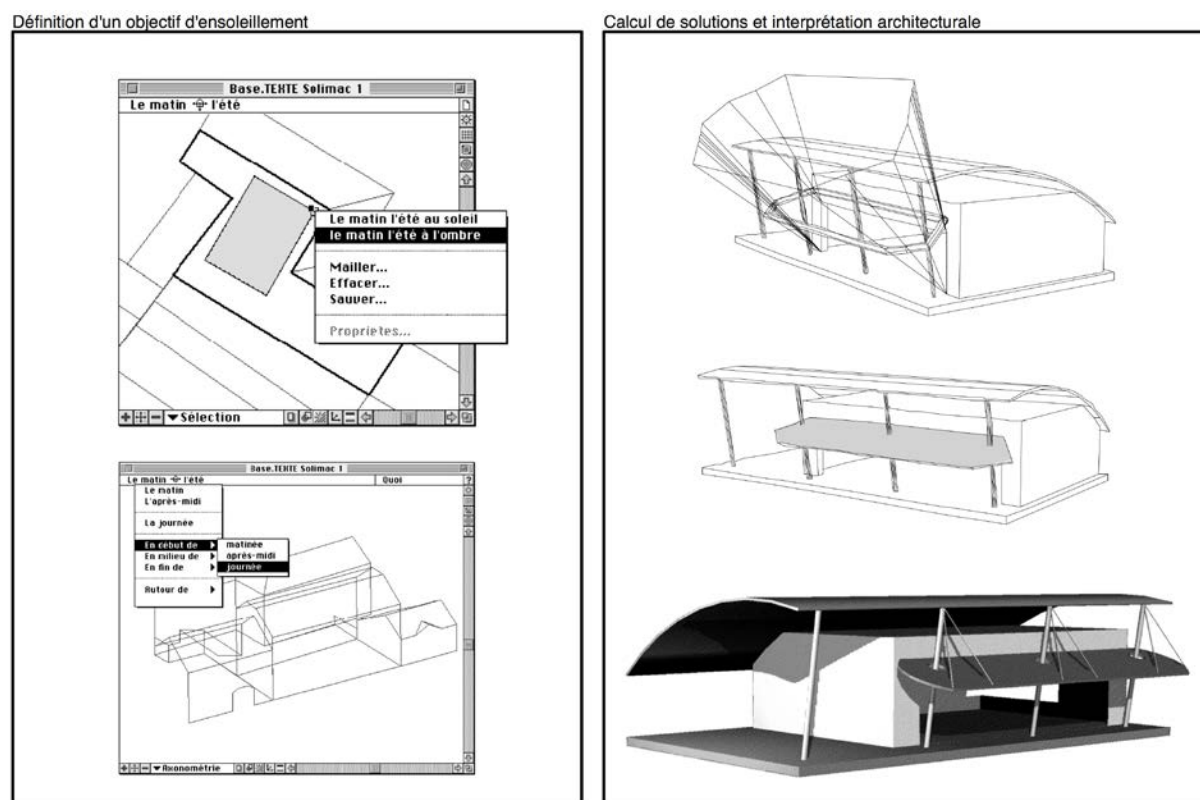


Fig 80. Interface et fonctions de Solimac (Siret, 1997)

D'autres méthodes de modélisation déclaratives utilisent un langage de description graphique pour décrire les objectifs ou les intentions des concepteurs. Dans son travail de thèse, Vincent Tourre (Tourre, 2007) propose une méthode déclarative d'assistance à la conception utilisant un langage graphique de description des intentions d'effet de lumière naturelle à l'intérieur d'une pièce. Ce processus commence par une phase de caractérisation du contexte de modélisation en définissant un modèle géométrique d'une configuration spatiale, la surface d'ouverture et la direction des apports lumineux. L'utilisateur dispose d'un ensemble de descripteurs graphiques qui permettent de retranscrire le contraste de luminance sur les différentes parois de l'espace représentant ainsi l'effet de lumière qu'il cherche à obtenir (Cf. Fig 81). Le modèle déclaratif fait appel à un modèle de connaissance quantitative et qualitative de la lumière naturelle pour traduire cette description en données géométrique. Le modèle géométrique construit une configuration d'ouverture sous la forme d'un maillage tronqué qui vérifie la description de l'effet pour les conditions d'éclairage définies au début du processus. Ce maillage abstrait nécessite un travail d'interprétation par le concepteur pour définir un dispositif d'éclairage.

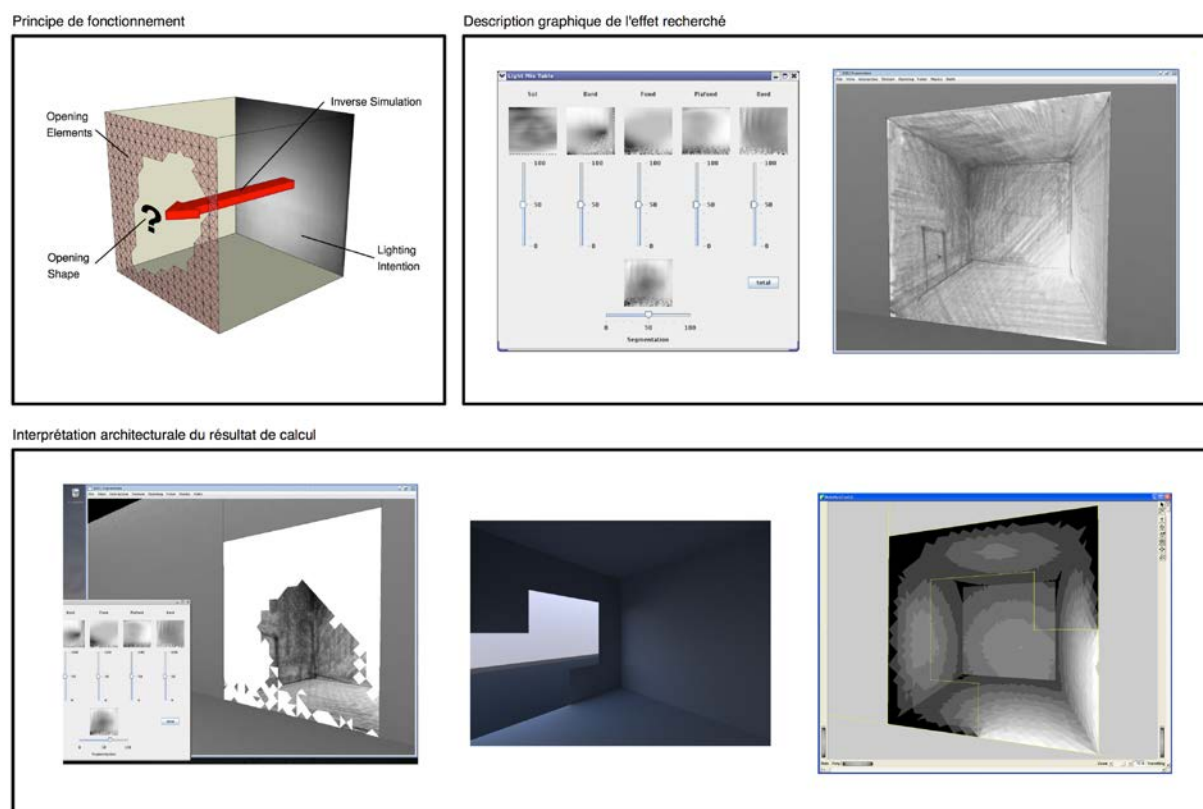


Fig 81. Principe de fonctionnement et résultats de la méthode déclarative proposée par Vincent Tourré (Tourré, 2007)

LightSketch (Glaser et al., 2003) est un outil de modélisation utilisant un langage de description graphique pour la modélisation de scènes d'éclairage naturel et artificiel. Cet outil propose un processus de modélisation graphique faisant appel à une grammaire de signes pour représenter les entités géométriques d'un espace et des dispositifs d'éclairage naturel et artificiel. Cette méthode fait appel à un traducteur (*Satin*) qui interprète les données graphiques saisies pour les convertir en dispositifs architecturaux ou d'éclairage constituant ainsi la scène tridimensionnelle. Un moteur de simulation (Radiance®) permet d'évaluer le comportement lumineux sous différentes conditions d'éclairages et propose un rendu photo-réaliste de la scène éclairée. Un modèle de visualisation propose des options d'affichage de la scène d'éclairage prenant en compte la variation de l'effet de lumière produit dans le temps (jour, heure et saisons) (Cf. Fig 82).

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

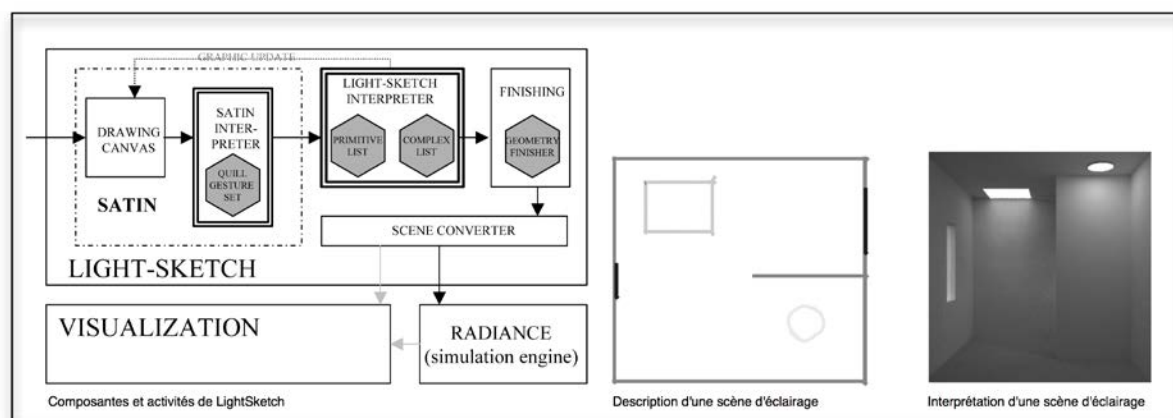


Fig 82. Processus et résultats du modèle déclaratif *LightSketch* extrait de (Glaser et al., 2003)

3.2 Supports d'assistance utilisant des modèles génératifs

Ces méthodes dites génératives sont traditionnellement appliquées dans l'ingénierie où il est question de parcourir un espace de solution afin de résoudre un problème d'optimisation. Dans ce contexte on peut citer les algorithmes évolutionnaires qui sont définis comme étant « *des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur un parallèle grossier avec l'évolution darwinienne des populations biologiques. Ils fournissent une approche heuristique, à l'occasion performante, et dans certains cas prouvée* » (Schoenauer, Sebag, 2007). Les algorithmes évolutionnaires se divisent en quatre grandes familles : la *programmation évolutionnaire* (Fogel et al., 1966), les *stratégies évolutionnaires* (Rechenberg, 1973), les *algorithmes génétiques* (Holland, 1975) et la *programmation génétique* (Koza, 1994). Cette classification prend comme référence les travaux de Peter Bentley (Bentley, 1999) et de Jean-Philippe Rennard (Rennard, 2002). Malgré quelques différences dans les schémas de fonctionnement de ces différentes familles, les algorithmes évolutionnaires gardent en communs certaines terminologies et certaines notions. Ces dernières sont inspirées des théories de l'évolution naturelle et de la génétique. Les algorithmes évolutionnaires cherchent à optimiser une fonction f à valeurs réelles définie sur un espace de recherche Ω . La fonction f est une fonction d'objectif à optimiser pour atteindre un minimum, un maximum ou bien une valeur bien déterminée. Cette fonction est couramment appelée *fitness*. Les points de l'espace de recherche Ω sont appelés des individus. L'ensemble des individus constitue des populations et enfin, une génération représente une itération du processus de l'algorithme.

Le processus génératif commence par une phase d'initialisation de la population Π_0 en choisissant P individus dans Ω . Ce choix est fait généralement par tirage aléatoire avec une probabilité uniforme sur Ω . Les individus de Π_0 sont ensuite évalués en calculant la valeur de la fonction d'objectif f . Les individus de la population Π_0 ayant une valeur de la fonction f proche de la valeur objectif sont sélectionnés. Les individus sélectionnés sont croisés tout en subissant des opérations mutations pour générer des enfants. Les individus issus de ce croisement constituent une nouvelle population Π_1 . Ce

processus se répète d'une manière itérative jusqu'à l'atteinte de l'objectif recherché. Le processus génératif peut s'arrêter indépendamment des résultats obtenus, mais plutôt à partir de ses propres paramètres de fonctionnement. Ces paramètres fixent des limites au processus de génération pour l'arrêter au bout d'un nombre défini de générations ou d'un temps de calcul maximal (Cf. Fig 83).

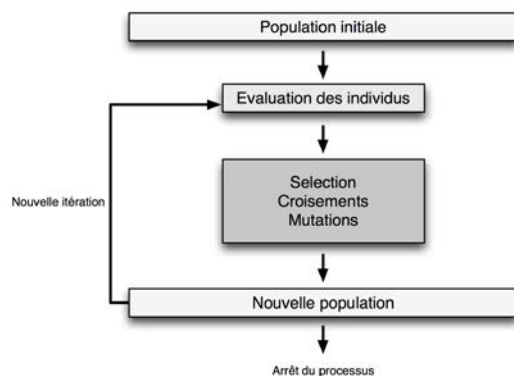


Fig 83. Processus d'un algorithme évolutionnaire

Les modèles génératifs ouvrent des perspectives d'exploration de nouvelles formes architecturales et élargir l'éventail des possibilités offertes aux concepteurs. Ces modèles participent à l'activité créative du processus de conception architecturale jusque-là réservée uniquement aux concepteurs. Les algorithmes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale ont jusqu'à maintenant été réservés à un public d'initiés constitués particulièrement de chercheurs. Ils ont permis de mettre en place des méthodes d'optimisation appliquées à la maîtrise du comportement thermique, lumineux ou structurel du projet d'architecture. Par exemple, L. G Caldas et L. K. Norford (Caldas, Norford, 2003) proposent une méthode générative d'optimisation multi-objectifs de configurations architecturales portant sur différents critères : forme, orientation, taille d'ouverture, système de chauffage et système de climatisation. Ce type d'optimisation offre au concepteur en ensemble de solutions architecturales qui vérifient à différents niveaux des objectifs de consommation énergétique et d'éclairage. Ainsi, la solution architecturale n°1 offre la meilleure forme en terme de chauffage (solution avec des ouvertures orientées au sud et à ouest et une forme de forte compacité) alors que la solution n°6 offre la meilleure forme en terme d'éclairage naturel (solution avec des ouvertures orientées au Nord et à l'Est avec des formes de faible largeur). Le reste des solutions offrent des niveaux d'optimisation intermédiaires par rapport aux objectifs de chauffage et d'éclairage naturel (Cf. Fig 84).

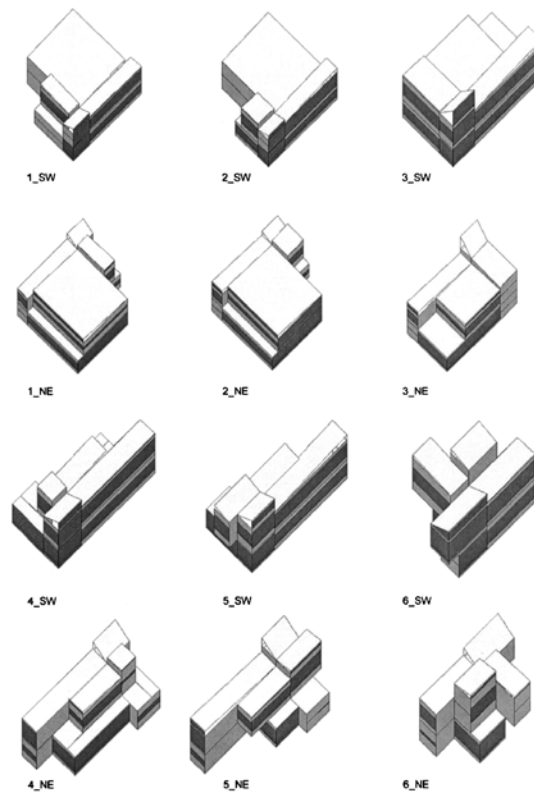


Fig 84. Solutions générées par la méthode d'optimisation multi-objectifs (Caldas, Norford, 2003)

Récemment on assiste à une intégration des algorithmes évolutionnaires dans des logiciels de modélisation paramétrique qui démocratise leur utilisation. Dans ce courant, un algorithme génétique d'optimisation comme *Galapagos*¹⁰ ou *Goat*¹¹ est intégré dans l'éditeur d'algorithmes paramétriques *Grasshopper*[®] plug-in du modèleur géométrique 3D *Rhinoceros*[®]. Ces composants intègrent des algorithmes d'optimisation de type évolutionnaire, *COBYLA* (*Constrained Optimization BY Linear Approximations*) ou *BOBYQA* (*Bounded Optimization BY Quadratic Approximations*). Ces modules ont rendu possible l'utilisation des moteurs génératifs dans des contextes de conceptions réels et par des utilisateurs non initiés. En effet, les potentialités offertes par *Grasshopper*[®] et particulièrement la programmation graphique ainsi que la simplicité de paramétrage et d'utilisation de *Galapagos*[®] ont donné l'occasion aux architectes de se lancer dans la création de modules permettant de chercher et de générer des solutions optimales en prenant en compte un ensemble de contraintes liées à la conception de leurs projets (Cf. Fig 85).

¹⁰ *Galapagos*[®] est développé par David Rutten-Robert McNeel & Associates

¹¹ *Goat*[®] est développé par Simon Flöry-Rechenraum e.U

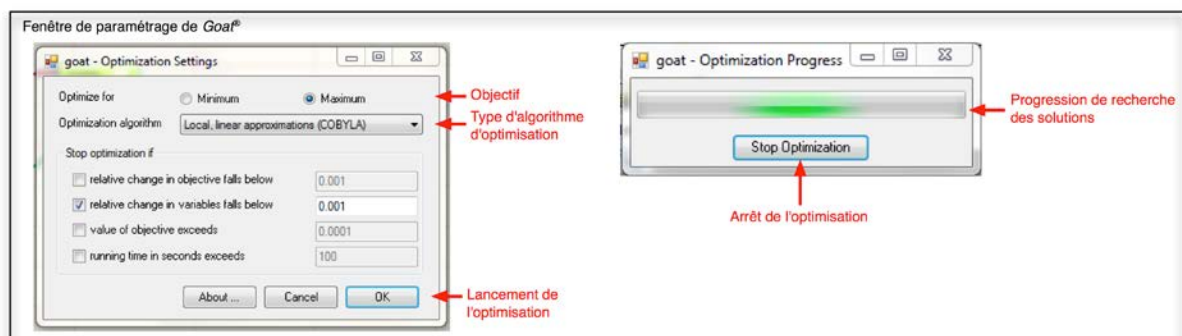
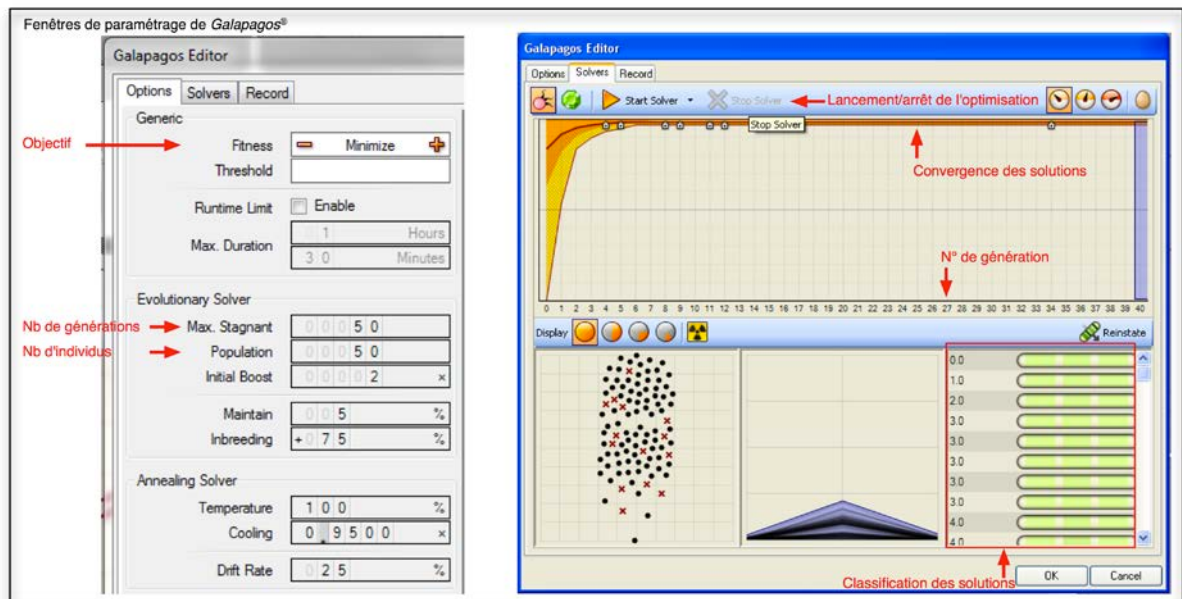
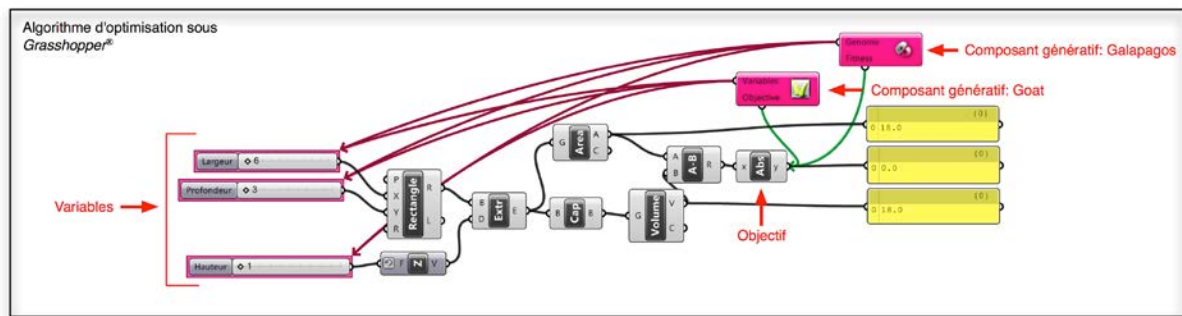


Fig 85. Exemples d'algorithmes d'optimisation sous Grasshopper® (Galapagos® et Goat®)

3.3 Supports d'assistance utilisant des modèles de simulation

Un modèle de simulation est une abstraction des phénomènes physiques qui caractérisent le milieu architectural (structure, thermique, lumière) sous la forme de fonctions de calcul (modèle mathématique). Ces fonctions présentent différents niveaux d'abstraction et de complexité qui varient selon le niveau de correspondance par rapport à la réalité. Les modèles mathématiques décrivant d'une manière précise et détaillée la réalité des phénomènes physiques donnent lieu à des fonctions

complexes. Ces dernières intègrent l'ensemble des paramètres qui caractérisent le phénomène physique ainsi que son mode de variation dans le temps et dans l'espace.

Les modèles mathématiques de caractérisation des phénomènes physiques sont traduits sous la forme d'algorithmes de simulation qui permettent de structurer les opérations de calculs. Les phénomènes d'éclairage naturel et artificiel sont modélisés par des algorithmes de type lancer de rayons (*Ray Tracing*) et de radiosité (*Radiosity*) qui synthétise les phénomènes de transfert et de propagation des rayonnements lumineux sur les surfaces. Ces algorithmes prennent en compte la composante directe et indirecte de la lumière pour proposer des évaluations quantitatives (valeurs d'éclairement, de luminances, apports solaires) et qualitatives (rendu photo-réalistes). Le processus de fonctionnement des modèles de simulation de la lumière est organisé en 3 étapes : une phase de modélisation et de caractérisation de l'objet d'étude, une phase de calcul (rendu) et une phase de visualisation des résultats. La première phase de modélisation consiste à définir un modèle géométrique et les attributs de l'objet d'étude selon deux schémas. Le premier schéma consiste à importer le modèle géométrique à partir d'un modèleur géométrique sous un format de fichier reconnu par de l'algorithme de simulation alors que le deuxième schéma consiste créer les entités géométriques en utilisant le modèle géométrique propre à l'algorithme de simulation. La définition des attributs est généralement assurée par l'algorithme de simulation qui définit les propriétés des entités géométriques (propriétés des matériaux des surfaces) et les conditions de simulation (type de simulation, type de ciel, date, heure) nécessaires pour le lancement des calculs. La deuxième phase fait intervenir le modèle de simulation qui calcule la trajectoire et le mode de propagation des apports lumineux en tenant compte des conditions de simulation et des propriétés des différentes surfaces du modèle géométrique.

La dernière phase de visualisation des résultats de simulation offre la possibilité à l'utilisateur du modèle de simulation d'avoir une lecture du comportement lumineux et de l'influence de ces choix de conception (forme et propriétés du modèle géométrique). Certains modèles de simulation intègrent des modèles de visualisation qui assurent l'activité d'interprétation des résultats de calcul sous la forme de graphes, de diagrammes ou de rendu en fonction du type de données traitées. D'autres modèles génèrent des résultats sous la forme de données brutes (valeurs numériques) qui nécessitent des modèles de visualisations externes.

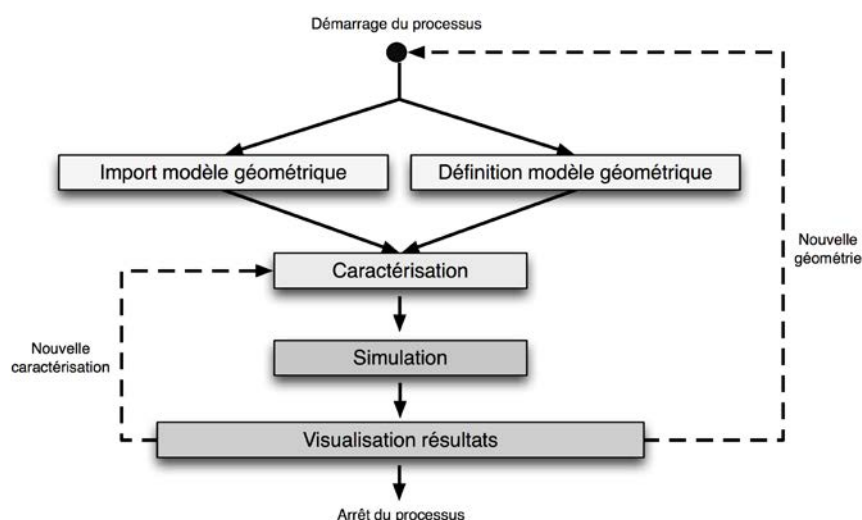


Fig 86. Processus d'un modèle numérique de simulation

*Radiance*¹² est un modèle de simulation de lumière naturelle et artificielle intégrant des algorithmes de calcul de type lancer de rayon et illumination globale. Cet algorithme permet de calculer et de caractériser les apports lumineux (éclairage, luminance, apports solaires, FLJ, éblouissement et autonomie d'éclairage) sur des points de calculs ou sur des supports graphiques de type image photo-réaliste, image en fausses couleurs, images avec des courbes isolux et digrammes. Radiance est considéré parmi les logiciels les plus performants en terme de correspondance avec la réalité, il « *livre des images très proche de la réalité : les taches de soleil et les ombres portées sont respectées, l'évolution de la répartition de la lumière dans la chapelle au cours de la journée est similaire.* » (Reiter, De Herde, 2004). Le modèle de simulation de Radiance ne dispose pas d'interface de modélisation, de paramétrage ou de visualisation des résultats. La modélisation et le paramétrage des entités géométriques sont déterminés à partir de ligne de commande textuelle. Les résultats de simulations sont présentés sous la forme de tableaux de valeurs au format *CVS*¹³ (résultats numériques) et de fichiers image *PIC* (résultats graphiques).

¹² *Radiance* est développé par Environmental Energy Technologies Division du Lawrence Berkeley National Laboratory.

¹³ *Comma-separated values*: représentation de données tabulaires sous la forme de valeurs séparées par des virgules.

Syntaxe de description d'une sphère

```

modifier sphere identifier
0
0
4 xcent ycent zcent radius

```

Format des résultats de simulation des éclairagements

Coordonnées des points de calculs			Normales			Valeurs des résultats		
X	Y	Z	$\sqrt{x}$	$\sqrt{y}$	$\sqrt{z}$	R	V	B
-63.321	-19.85	0.85	0	0	1	4.472721e+001	4.472721e+001	4.472721e+001
-54.198	-19.85	0.85	0	0	1	4.305374e+001	4.305374e+001	4.305374e+001
-45.075	-19.85	0.85	0	0	1	4.276411e+001	4.276411e+001	4.276411e+001
-35.952	-19.85	0.85	0	0	1	4.312430e+001	4.312430e+001	4.312430e+001
-26.829	-19.85	0.85	0	0	1	4.338306e+001	4.338306e+001	4.338306e+001
-17.706	-19.85	0.85	0	0	1	4.341609e+001	4.341609e+001	4.341609e+001

Fig 87. Syntaxe de modélisation géométrique et format des résultats de calculs fournis par *Radiance*[®]

Au regard de la complexité de définition des données du modèle de simulation et de description des résultats, l'utilisation de ces types de moteur de calcul nécessite le recours à des logiciels intermédiaires de traduction de ces données d'entrées et de sorties. Ils traduisent les modèles issus des modeleurs géométriques dans la syntaxe des moteurs de calculs et proposent des interfaces de visualisation des résultats. On peut citer comme exemple de plate forme le logiciel *Daysim*[®] (Bourgeois et al., 2008) développé par Christoph Reinhart (Fig 88) qui intègre le modèle de simulation *Radiance*[®]. Il propose une interface de configuration (définition du contexte de simulation, choix de matériaux, type de simulation et paramètres de précision de simulation) et de démarrage du modèle de simulation. La modélisation géométrique de l'objet d'étude et la visualisation des résultats sont assurées par un modeleur géométrique 3D *Sketchup*[®] et le plug-in *su2ds*¹⁴.

¹⁴ *su2ds*[®] est créée par Josh Kjenner pour le Manasc Issac Architects supporté par le National Research Council's IRAP (Canada). Il est basé sur le plugin d'export entre *Radiance*[®] et *Sketchup*[®] (*su2rad*[®]) développé par Thomas Bleicher's.

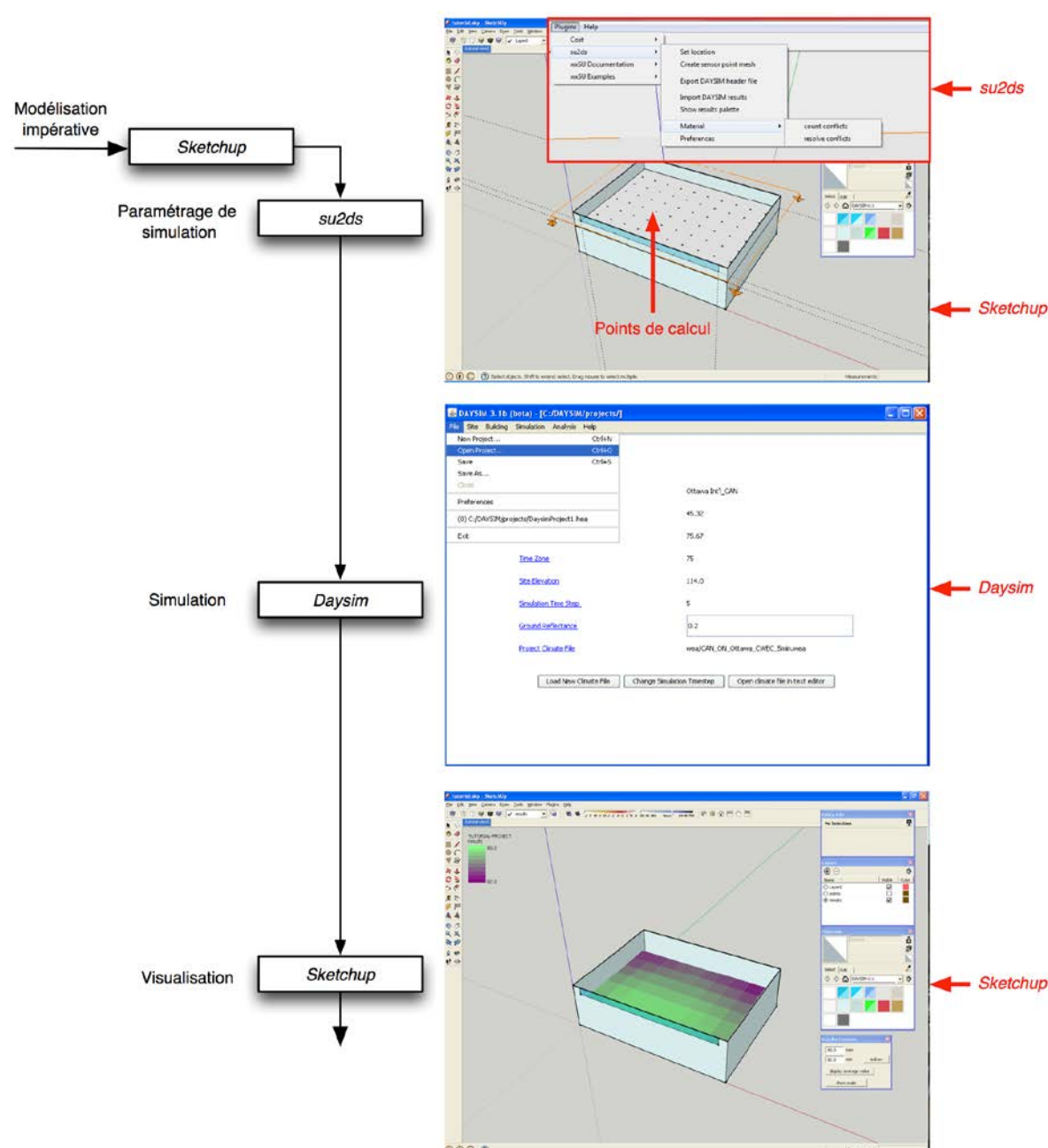
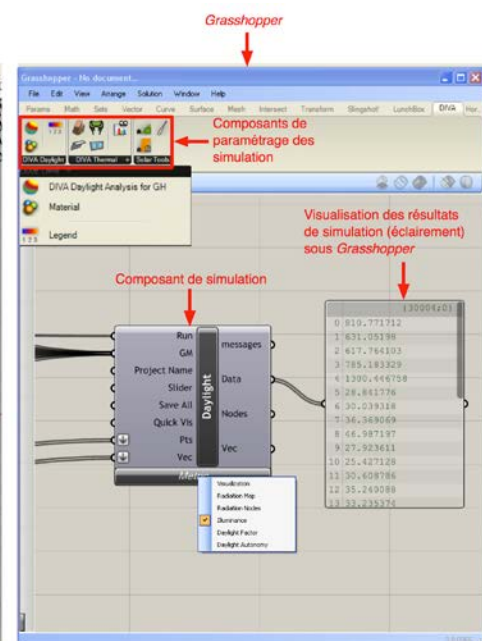
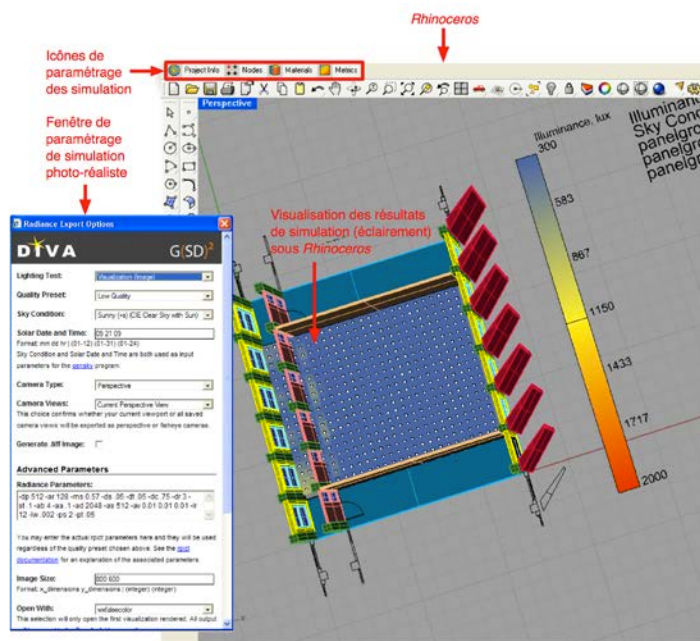
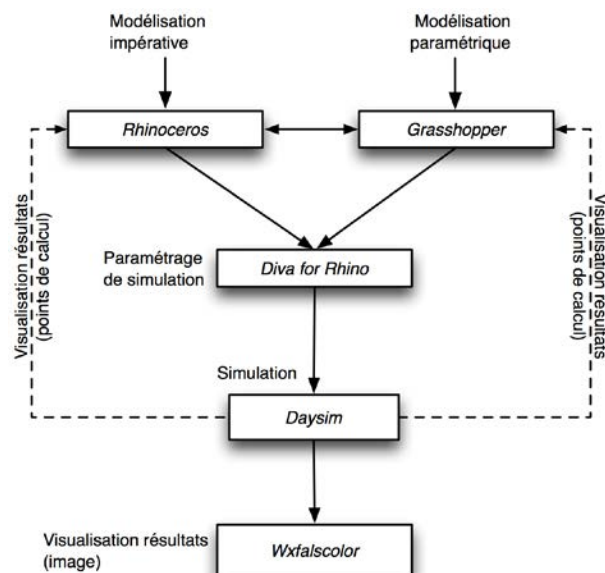


Fig 88. Processus et interface de Daysim®

Le plug-in Diva-for-Rhino^{® 15} crée une passerelle entre le modèleur 3D *Rhinceros*[®] ainsi que son éditeur d'algorithme graphique *GrassHopper*[®] et deux modèles de simulation : *Radiance*[®] pour les simulations de la lumière et *EnergyPlus*[®] pour l'évaluation du comportement thermique d'un espace (Cf. Fig 89). Cette passerelle permet de récupérer les modèles géométriques directement à partir du modèleur 3D impératif et paramétrique. Ce plug-in dispose d'outils de définition de paramètres de simulation sous la forme de fenêtres sous *Rhinceros*[®] et de composants sous *Grasshopper*[®]. La

¹⁵ D'autres plug-in propose les mêmes fonctions de liaison entre des logiciels de modélisation et des moteurs de calcul. On peut citer *OpenStudio*[®] créant une passerelle entre le modèleur *SketchUp*[®] et les moteurs de calcul *Radiance*[®] et *EnergyPlus*[®]. Le plug-in *Geco*[®] qui propose une liaison entre *Rhinceros*[®] + *Grasshopper*[®] comme logiciels de modélisation et *Ecotect*[®] comme logiciel de simulation.

visualisation des résultats de calcul métriques (éclairage, apports solaires et FLJ) est faite directement sur le modèle géométrique avec une légende en dégradé de couleur. Le logiciel de visualisation *wxfalsecolor*¹⁶ permet de visualiser et de gérer les résultats graphiques comme les cartes des apports solaires ou les rendus photo-réalistes. Ce type de plug-in crée de nouvelles pratiques des modèles de simulation exploitant le potentiel d'exploration et de recherche des modèles géométriques paramétrique.



¹⁶ *wxfalsecolor*[®] est développé par Thomas Bleicher, il se lance automatiquement suite à la finalisation du processus de simulation.

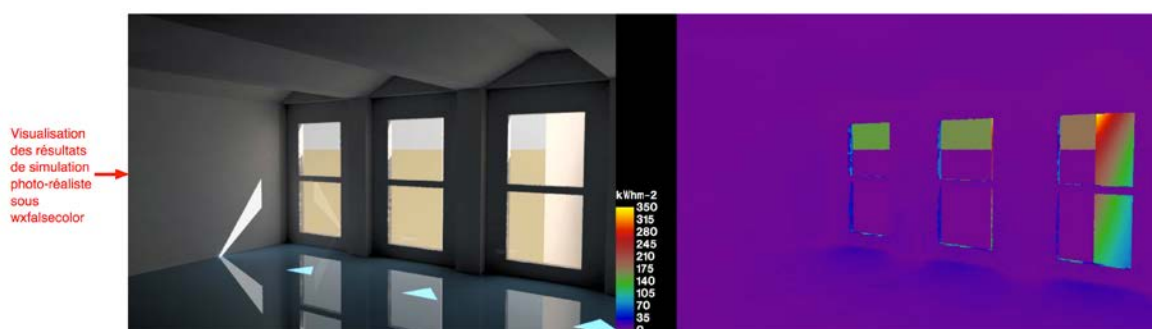


Fig 89. Processus de fonctionnement, interface et résultats de *Divi-For-Rhino*® (plug-in de connexion entre Rhinoceros® / GrassHopper® et Radiance®)

D'autres outils de simulation associent trois modèles numériques : un modèle géométrique, un modèle de simulation et un modèle de visualisation. Parmi ce type de logiciel, on peut citer *Autodesk Ecotect*® qui propose une possibilité d'import de géométrie sous différents formats associée à une interface de modélisation géométrique propre au logiciel de simulation. Ce logiciel dispose de son propre modèle de simulation et crée des passerelles avec des modèles de calcul plus complexes de type Radiance®. La visualisation des résultats de simulations se fait directement sur le modèle géométrique pour les résultats métriques et sur des fenêtres de visualisation externes pour les résultats graphiques (Cf. Fig 90). L'utilisation de ce type d'outil numérique de simulation reste réservée à un public averti à cause de la complexité des interfaces et des données de paramétrage des simulations et de l'interprétation des résultats. En effet ces activités demandent une connaissance détaillée du mode de fonctionnement de l'outil de simulation et des domaines d'étude traités. L'utilisation est également limitée par la durée de calcul qui reste assez longue pour participer aux activités itératives qui caractérisent le processus de conception.

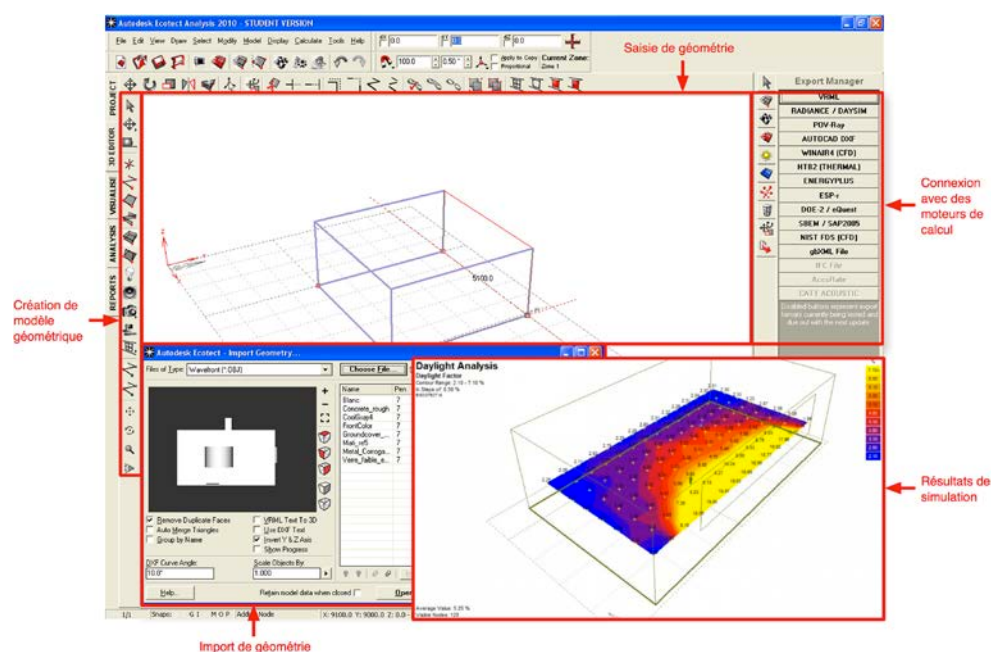
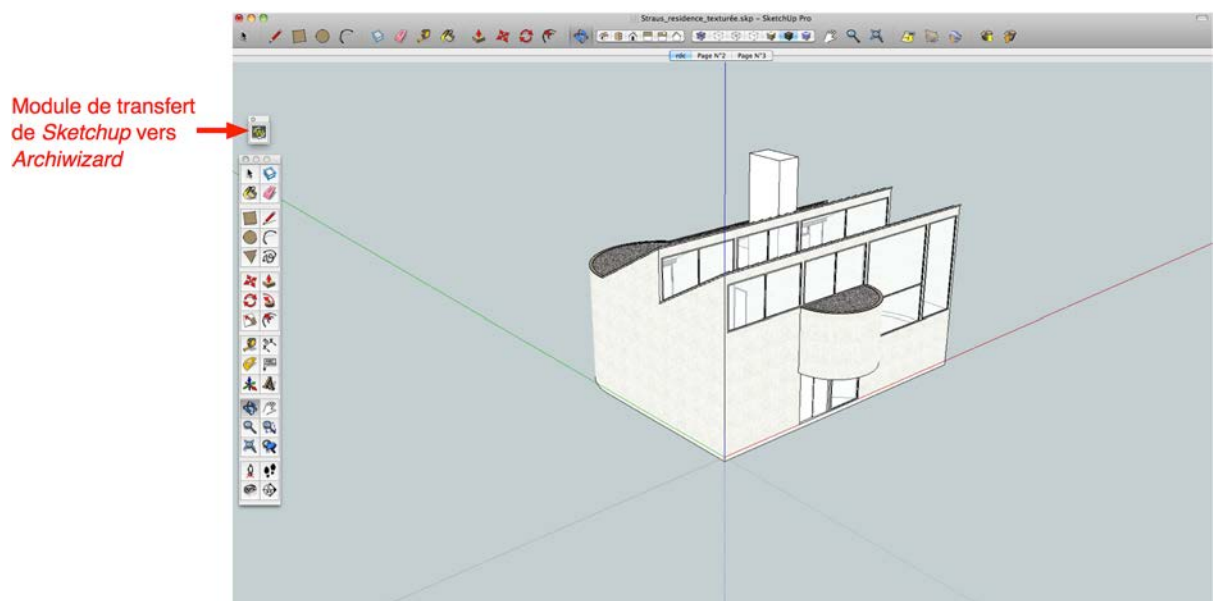


Fig 90. Fenêtres de modélisation géométrique, d'export vers les modèles de simulation et de visualisation des résultats dans *Ecotect*®

« Une seconde méthode, plus élaborée, passe par le calcul informatique. Pour être efficace, elle nécessite de posséder des informations précises sur l'environnement extérieur, l'architecture et ses aménagements intérieurs. Ses résultats sont très intéressants à condition qu'ils soient bien exploités, c'est à dire avec intelligence. Cette manière de calculer est de plus en plus « démocratisée » grâce à la mise à disposition de logiciels professionnels réactifs et conviviaux. Il nous importe ici, dans l'exploitation des résultats, de ne pas noyer le maître d'œuvre ou le maître d'ouvrage sous des montagnes de feuillets de chiffres et d'hypothèses, mais d'en dégager les dominantes, et une ou quelques interprétations, de manière synthétique et claire. » (Berne, 2011).

Une nouvelle génération d'outils développés pour des utilisateurs non initiés aux logiciels de simulation complexe. Certains logiciels comme *Archiwizard*[®] proposent des fonctions d'import et de mise à jour de modèle géométrique à partir de modèleur géométrique utilisé par les architectes (*sketchup*[®] et *Revit*[®]) associés à des moteurs de calcul en temps réel (Cf. Fig 91). Ce type de dispositif établit une continuité entre le concepteur et le logiciel de simulation permettant d'évaluer d'une manière instantanée l'influence sur le comportement lumineux et thermique des modifications apportées au projet.



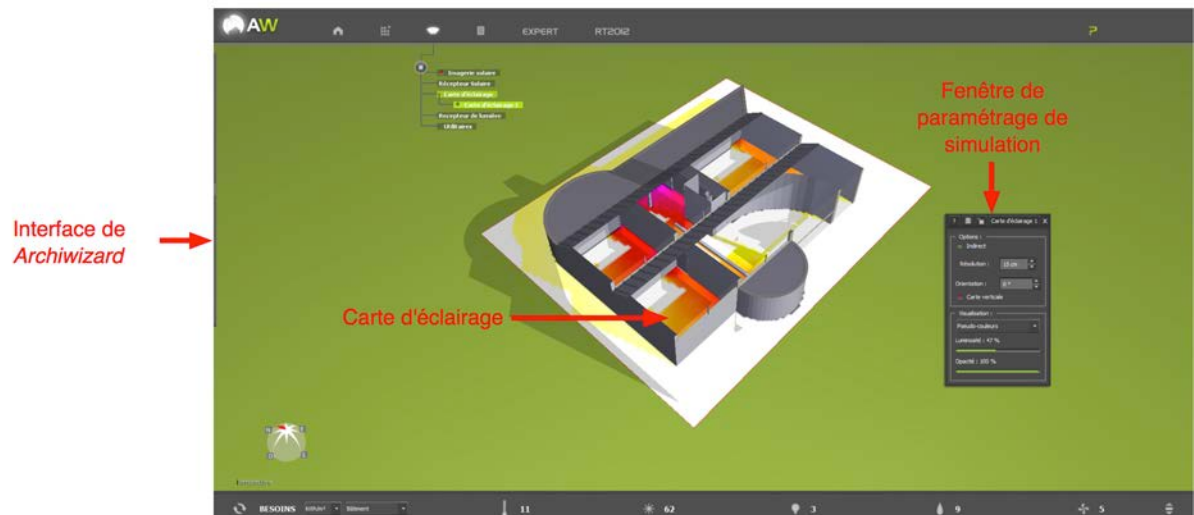
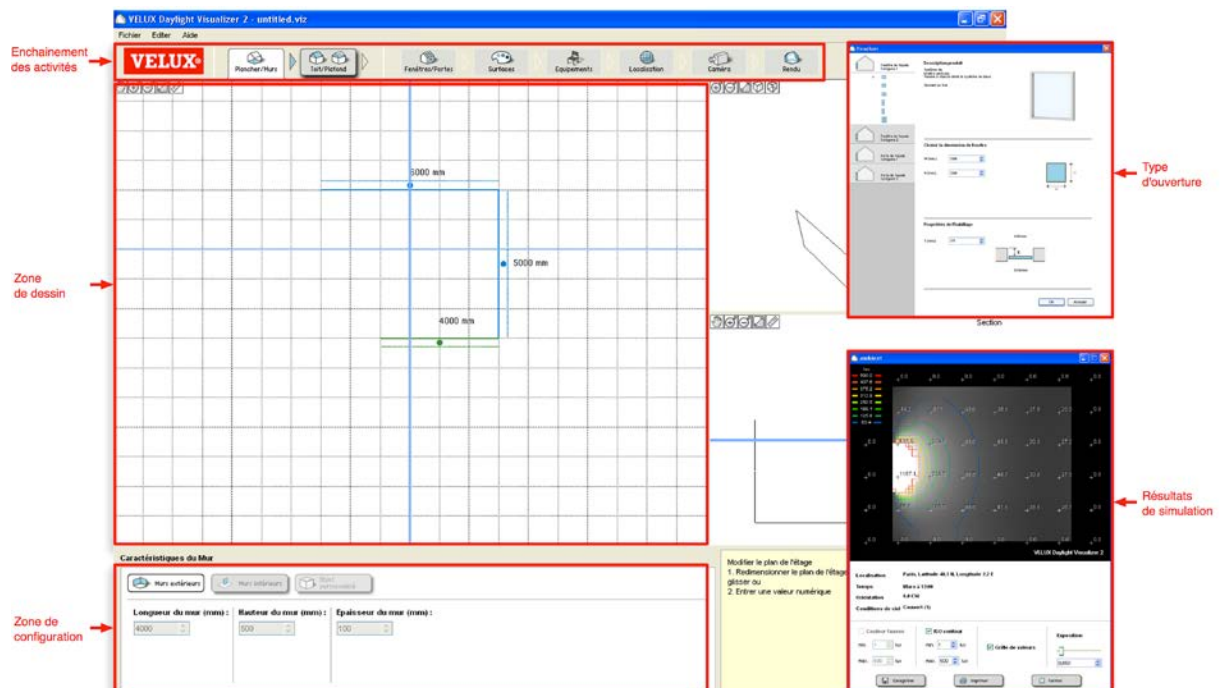


Fig 91. Import et mise à jour de la géométrie de Sketchup® vers ArchiWizard®

D'autres logiciels comme *Velux Visualizer*® ou *Leso Dial*® proposent des interfaces simplifiées présentant une liste d'étapes à réaliser organisée selon un cheminement linéaire. Ces logiciels permettent d'importer une géométrie issue d'un modèleur classique ou de saisir un modèle en exploitant les fonctions de modélisation paramétrique. Ils proposent des listes de choix de types d'espace et de type de matériaux prédéfinis assistant ainsi l'utilisateur durant ses activités de modélisation et de caractérisation des modèles géométriques des objets d'étude (Cf. Fig 92).



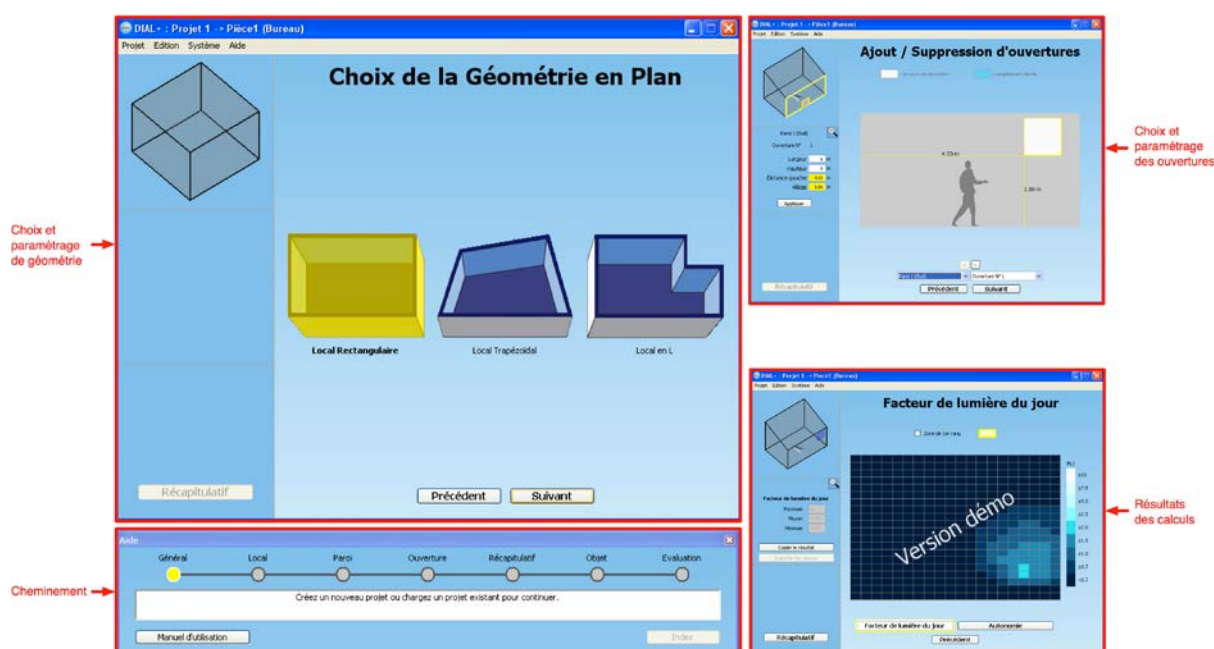


Fig 92. Fenêtres de saisie, de paramétrage et de simulation de Velux Visualizer® (haut) et de Leso Dial® (bas)

4. Synthèse

Nous avons essayé dans cette partie de retracer l'ensemble des méthodes et des outils d'assistance utilisés dans la conception architecturale. Nous avons proposé une classification selon le type de support d'assistance utilisé par ces méthodes ce qui a permis de mettre en évidence leurs apports et leurs potentialités d'assistance à l'intégration et à la maîtrise de la lumière naturelle durant les différentes phases du processus de conception (Cf. Fig 93). Cette analyse montre l'adaptation progressive de certaines méthodes issues de l'ingénierie vers la conception architecturale.

Nature	Support d'assistance	Exemple
Supports d'assistance exploitant les références	Les documents de références	Les dix livres d'architecture de Vitruve, SMLXL
	Les outils d'exploration des références	Day@mbinace
	Les manuels techniques	Daylight design of buildings-Neufert
	Les abaques de représentation et de calcul	Lumcalcul
Supports d'assistance exploitant les modèles physiques	Maquettes	Maquette d'étude - maquette d'évaluation
	Héliodon-Soufflerie-Ciel artificiel	Model 126-SkyDome
Supports d'assistance exploitant les modèles numériques	Modèle géométrique impératif	AutoCad® - Sktechup®
	Modèle géométrique paramétrique	Maya®-Grasshopper®-Dynamo®
	Modèle géométrique sémantique	Revit®-Archicad®
	Modèle géométrique déclaratif	WordsEye®-Solimac
	Modèle génératif	Galapagos®- Goat®
	Modèle de simulation	Radiance®-Ecotect®-Velux Visualizer®-Leso Dial®

Fig 93. Classification des méthodes d'assistance

La partie suivante se propose d'évaluer la capacité d'adaptation de ces méthodes aux phases qui caractérisent le processus de conception architecturale. Nous essayons de confronter les potentialités de ces méthodes avec les contraintes et les besoins posés par le concepteur et les activités de conception. Il s'agit d'identifier les points de convergences et de divergences entre les potentialités offertes par les outils d'assistance et les besoins des utilisateurs. Cette confrontation nous permettra de

définir des pistes pour la mise en place d'une méthode d'assistance à la conception d'ambiances lumineuses adaptée aux phases amont de la conception architecturale.

Chapitre V. Méthodes d'assistance et processus de conception architecturale

La première partie de ce chapitre a permis de classer les différentes méthodes et outils accompagnant la conception architecturale et particulièrement la maîtrise des ambiances lumineuses. Cette classification a été élaborée selon le type de support d'assistance utilisé par ces méthodes. Cette classification a donné lieu à trois grandes familles exploitant respectivement des références, des supports physiques et des supports numériques. L'objectif de la première partie de ce chapitre est de confronter ces méthodes avec le processus de conception architecturale et d'évaluer leurs apports. Cette évaluation permettra de proposer une nouvelle classification qui prendra en compte le mode, le moment et la nature de participation de chacune de ces méthodes dans le processus de conception.

La deuxième partie de ce chapitre essaye de définir le niveau réel de participation et d'adaptation de ces méthodes dans le contexte de la conception architecturale. Cet état des lieux est déterminé à partir d'enquêtes réalisées auprès des différents acteurs de la production architecturale évoluant dans le secteur de la formation, la production et la recherche en architecture.

1. Méthodes d'assistance et phases du processus de conception

1.1 Les méthodes adaptées aux phases conceptuelles du projet

Les méthodes adaptées aux phases conceptuelles du projet proposent d'accompagner les activités qui caractérisent les phases de « *formulation du problème* » et « *formulation de solution* »¹⁷ du processus de conception. Ces phases intègrent les activités de formalisation d'idées, de formalisation et d'évaluation de solutions par rapport aux contraintes du projet et aux intentions du concepteur.

Les méthodes utilisant des références permettent au concepteur de se construire un corpus d'étude composé d'exemples de références. Ces références constituent des réponses à des contraintes et des intentions que le concepteur utilise pour se construire une connaissance d'un domaine d'étude (architectural, physique, sensible, sociétal). Les références sélectionnées présentent un niveau de

¹⁷ Selon le découpage proposé par Robert Prost (Prost, 1992)

rapprochement avec les contraintes posées au concepteur. À partir de cette connaissance, le concepteur peut se constituer des orientations de conception et commencer à développer et à formaliser ses propres idées et intentions de conception.

Les méthodes de modélisation déclarative peuvent aider le concepteur à donner une forme matérielle aux idées et intentions qu'il a formulées. Le concepteur peut ainsi décrire les effets qu'il cherche à produire et avoir comme résultats une forme géométrique qui vérifie ces intentions. Ce type de méthode propose des solutions géométriques abstraites qui nécessitent une réinterprétation sous une forme architecturale. Dans le même contexte, la modélisation paramétrique offre la possibilité de créer d'une manière itérative des formes de matérialisation des idées. Le concepteur peut modéliser plusieurs formes architecturales, évaluer leurs validités et remodifier leurs propriétés pour en créer des nouvelles. L'association de modèles géométriques paramétriques avec des modèles de simulation de la lumière naturelle crée une continuité avec les activités de conception où le concepteur évalue l'influence de ces choix de configuration sur le comportement lumineux. La prise de connaissance des résultats des évaluations définit le type de modification que le concepteur va établir pour optimiser le comportement de sa proposition et atteindre un objectif bien déterminé.

La phase itérative de définition de configuration, d'évaluation et de modification peut être cédée à un modèle génératif. Ce dernier prend en charge ces opérations itératives d'optimisation et offre au concepteur un ensemble de solutions qui vérifient un ou plusieurs objectifs. Les solutions proposées sont des références de conception vérifiant les intentions du concepteur et prenant en compte le contexte de conception du projet (site, localisation, forme architecturale).

D'autres types de méthodes d'assistance comme les abaques ayant un support numérique qui participe à ces phases conceptuelles du projet en donnant la possibilité au concepteur d'évaluer, rapidement et sans faire appel à un grand nombre de données complexes, l'influence d'un dispositif d'éclairage sur le comportement lumineux d'un espace. Ce même type d'assistance peut être assuré par des supports utilisant des maquettes physiques de faible niveau détail. Les héliodons permettent de définir les zones éclairées et les ombres portées pour une orientation définie à partir de simples maquettes volumétriques.

L'ensemble de ces méthodes permet de gérer et d'intégrer, à différents niveaux, l'incertitude caractérise les phases conceptuelles de conception. Elles supportent les activités de recherche et d'exploration des potentialités de conception nécessaire pour la proposition de réponses originales tout en établissant une maîtrise progressive des composantes du projet. Ces méthodes aident le concepteur à fixer les grandes lignes de son projet qui seront détaillées et précisées durant les phases avancées du projet.

1.2 Les méthodes adaptées aux phases avancées du projet

Les phases avancées du projet sont constituées de la phase de « *concrétisation de solution* » et d'« *appropriation de solution* ». La première phase est composée des activités de conception détaillées afin de préparer les activités d'implémentation et de mise en œuvre du projet. La deuxième phase porte sur les activités de communication et de diffusion du projet. Ces activités sont caractérisées par leur aspect précis et détaillé dans le but de garantir une représentation fidèle à la réalité matérielle des composantes du projet. Cette maîtrise est indispensable pour la préparation de l'exécution et la mise en œuvre du projet.

Les méthodes de modélisation géométrique sémantiques permettent d'assister ce type d'activité en proposant des fonctions de modélisation portant sur différentes dimensions du projet et prenant en compte les propriétés intrinsèques des objets à modéliser. Ce type de modélisation prend en considération la dimension constructible des objets modélisés. Les outils de modélisation de type *BIM* proposant des fonctions de caractérisation des matériaux de composition et des propriétés physiques des entités géométriques modélisées. Ce type d'outil gère les relations de hiérarchie et les conflits entre les différentes entités modélisées en prenant en compte des connaissances issues du secteur de la construction. Ils offrent des modes de représentations et de partages des modèles géométriques adaptés aux types d'acteurs (ingénieur, architecte, entreprise).

Les méthodes de simulation détaillées utilisent les modèles géométriques et les informations de caractérisation détaillées (forme géométrique, propriétés des matériaux, heure et date des simulations, conditions d'éclairage, environnement immédiat, masques solaires) pour effectuer des évaluations de vérification donnant lieu à des validations de choix de conception par rapport aux contraintes et aux normes imposées aux projets. Ce type de méthode assure une intégration de l'ensemble des paramètres déterminant le mode de variation du comportement physique des composantes de l'espace garantissant ainsi un fort niveau de proximité avec la réalité. Les rendus photo-réalistes réalisés à partir des modèles numériques détaillés participent aux activités de communication du projet. Ils donnent une lecture proche de la réalité du futur projet et de son mode d'insertion dans son environnement naturel et urbain.

Les méthodes d'évaluation utilisant des modèles physiques détaillés participent aux mêmes activités d'évaluation précise et de communication du projet. Les maquettes physiques utilisées en soufflerie ou sous de dispositifs de type ciel artificiel ou héliodons donnent l'occasion aux concepteurs de valider avec précision leurs hypothèses par rapport aux comportements lumineux et aérauliques de leurs propositions. Les conditions d'évaluation de ces dispositifs sont proches de la réalité permettant de recréer les mêmes conditions d'éclairage ou de mouvement d'air que le site d'implantation du projet.

2. Méthodes d'assistances et acteurs de la conception architecturale

Dans ce chapitre, nous essayons d'identifier le rapport entre les acteurs de la conception architecturale et les méthodes d'assistance à la conception. Ces acteurs sont composés de jeunes étudiants architectes, d'architectes professionnels et de chercheurs experts en développement de méthode et d'outil d'aide à la conception. Afin de dresser ce constat, nous avons fait appel à des enquêtes réalisées auprès de ces acteurs. Ces enquêtes réalisées auprès des professionnels et des chercheurs sont issues de travaux de recherches alors que l'enquête en milieu éducatif est issue d'un questionnaire que nous avons réalisé avec des étudiants de l'Ecole Nationale d'Architecture de Nancy.

2.1 Les méthodes d'assistances dans la pratique de la conception architecturale

Pour mettre en évidence de la place des méthodes d'assistance dans la pratique de la conception architecturale, nous avons exploité à deux études réalisées auprès des professionnels de la conception architecturale. La première étude a été élaborée par deux organismes professionnels d'Architectes flamands (Evelien et al., 2011 ; Weytjens et al., 2009). Elle se présente sous la forme d'un questionnaire distribué à l'ensemble des architectes flamands qui a obtenu 629 réponses ce qui correspondant à 64% des interrogés. Ce questionnaire avait pour but d'identifier les types de méthodes d'assistance à la conception utilisées quotidiennement par les architectes et leurs rôles durant les différentes phases du processus de conception. Les questions portent également sur les caractéristiques de ces méthodes et leurs influences dans les décisions des concepteurs. Enfin, ce questionnaire détermine le profil des participants ainsi que leur cadre de travail. La deuxième étude a été réalisée par une équipe de l'université technologique de Vienne auprès de 198 architectes autrichiens (Mahdavi et al., 2003). Cette étude empirique a essayé de déterminer le degré de familiarité et d'expérience qu'ont les architectes avec les outils d'assistance. L'objectif est d'identifier les problèmes rencontrés ainsi que les suggestions qu'ils peuvent proposer afin de promouvoir ce type d'outils. Le résultat vise à mettre en place des stratégies de développement d'outils en phase avec le processus de conception.

La première étude (architectes flamands) montre une large utilisation des manuels techniques, des documents de normalisation et de réglementation, des sources de références classiques (photos, livres, journaux) ainsi que des logiciels de modélisation 2D et 3D. En revanche, les méthodes de simulation, d'évaluation et d'analyse occupent une faible part dans la mesure où elles sont utilisées par moins de 30 % de l'ensemble des participants à cette enquête (Cf. Fig 94). Seulement 22% des architectes - flamands questionnés déclarent que leur conception est influencée par les résultats issus de ces méthodes donnant ainsi plus d'importance à l'expérience, aux normes et aux contraintes imposées par le client.

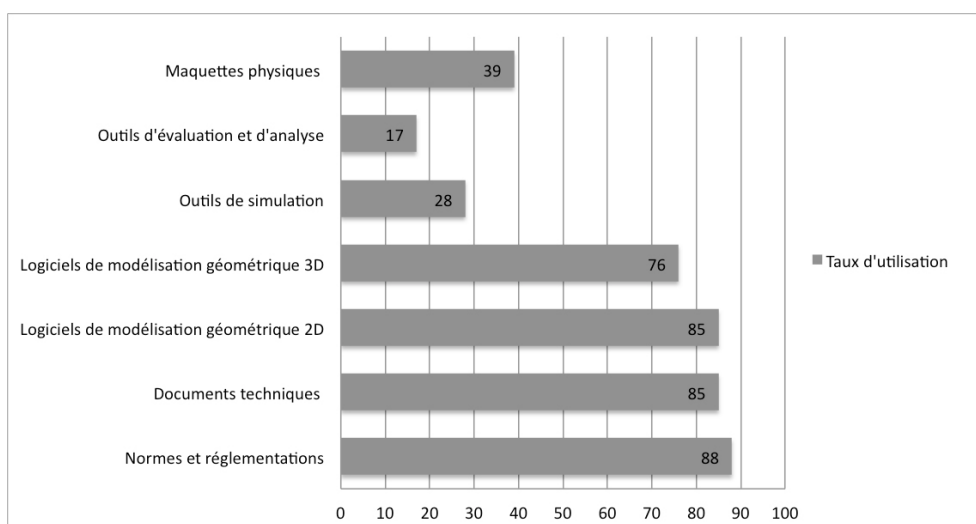


Fig 94. Taux d'utilisation des méthodes d'assistance à la conception par les architectes Flamants (Evelien et al., 2011)

Ce constat est le même pour les architectes autrichiens (ayant participé à la deuxième enquête) dont 16,7 % déclarent faire appel à des méthodes d'assistance à la conception de type outils de simulation et évaluation du comportement des bâtiments pour leurs projets dont la plupart sont limités à des études thermiques. Ce refus d'utilisation est expliqué par des facteurs majeurs comme le sentiment de non-besoin d'une assistance (24,2%), le manque de connaissances du personnel des agences par rapport aux méthodes et outils d'assistance (16,4%), le ralentissement du processus de conception (14,5%) et enfin la distance qui sépare ces méthodes des domaines de compétences des architectes (10,9%).

Cette évaluation révèle que les méthodes d'assistance sont majoritairement (75,8%) utilisées pour se conformer aux réglementations et aux normes imposées dans le secteur du bâtiment. En revanche, une très faible partie des architectes pensent que l'intégration de ces méthodes dans leur pratique peut leur permettre d'accélérer le processus de conception (9,1%) et d'améliorer la qualité de la conception (3%). La détermination du moment d'intervention de ces méthodes au processus de création chez les architectes autrichiens montre que la majeure partie (57,6%) les utilise pendant la phase de préparation des documents d'exécution, alors que moins de 7% les intègrent aux phases conceptuelles du projet.

Plusieurs facteurs de natures différentes expliquent le manque d'intégration des outils numériques de simulation chez les professionnels de la conception architecturale. Le premier facteur concerne les outils eux-mêmes. D'un côté, ils présentent des interfaces d'utilisation complexes et une difficulté de prise en main. D'un autre côté, l'utilisation des outils de simulation constitue une charge et une contrainte économique qui limite leur intégration et leur diffusion dans la pratique architecturale.

Le second facteur est en rapport avec la pratique de l'architecture elle-même. Les résultats des enquêtes montrent que les architectes estiment que ces méthodes d'assistance sont assez éloignées de leurs domaines de compétences et qu'ils n'ont ni les connaissances, ni les compétences nécessaires

pour les utiliser et les maîtriser. Ces réactions peuvent s'expliquer par le manque de formation et d'apprentissage autour de ces méthodes dans l'enseignement de l'architecture.

Le troisième facteur concerne le manque d'intérêt des maîtres d'ouvrages pour l'utilisation des outils de simulation afin de réaliser des travaux d'optimisation des performances de leurs projets. En effet les maîtres d'ouvrages ne prennent pas en considération le temps de travail investi pour ce type d'étude (sauf pour des projets complexes). Ce constat n'encourage pas les architectes à intégrer l'utilisation des outils de simulation dans le processus de conception du projet.

Ces deux études ouvrent de nouvelles perspectives de développement vers des méthodes d'assistance plus intégrées et plus adaptées aux activités de conception architecturale et particulièrement les phases conceptuelles déterminantes dans le déroulement du projet. Les participants aux deux enquêtes s'accordent sur le fait que les futures méthodes et outils doivent fournir des interfaces ayant une ergonomie adaptée à la conception architecturale offrant une facilité de manipulation et d'adaptation ainsi qu'un temps d'apprentissage et de mise en œuvre réduit. Ils doivent aussi offrir des interfaces et des potentialités d'échanges et de collaborations plus larges entre les différents acteurs projet.

La motivation pour l'utilisation et l'intégration des méthodes d'assistance doit venir du corps de métier de la conception architecturale. Il est le seul à pouvoir mobiliser les architectes à investir le temps, les ressources et les efforts nécessaires dans la prise en compte des méthodes et outils d'évaluation, d'analyse, d'optimisation des performances des bâtiments.

2.2 Les méthodes d'assistances et l'enseignement de l'architecture

Cette partie essaye de mettre en évidence le niveau de connaissance et d'utilisation des étudiants, poursuivant une formation d'architecte, des méthodes et les outils d'aide à la conception. Cette étude porte sur les méthodes et outils d'assistance de manière générale et plus particulièrement celles appliquées à la maîtrise du comportement lumineux. Pour répondre à ces objectifs, nous avons mis en place un questionnaire semi-dirigé (Cf. Annexe 1 : Fiches d'évaluation et d'aide à la conception en architecture) afin d'évaluer le niveau d'utilisation et l'aide apportée par les méthodes d'assistance utilisées dans un cadre pédagogique. 35 étudiants de l'Ecole Nationale d'Architecture de Nancy de niveau Master 2 ont participé à cette enquête. Les participants sont constitués de 90% d'architecte (étudiants en fin de formation ou jeunes diplômés) et de 10% ayant un profil d'ingénieur. La moitié des participants à l'enquête a une expérience professionnelle variant de 1 à 6 mois, 20% ont travaillé pour une durée de 6 à 12 mois, 11% ont une expérience professionnelle de 1-2 ans et enfin le reste des participants ont travaillé pendant une durée qui varie entre 1 et 10 ans.

La première partie du questionnaire comporte des questions permettant d'identifier comment les étudiants questionnés abordent la lumière naturelle en mettant en évidence les niveaux et les modes d'expression de la lumière naturelle dans le cadre de leurs formations ou activités professionnelles. La

deuxième partie cherche à définir le type d'usage et le niveau d'intégration des méthodes d'assistances chez les étudiants. Enfin, la dernière partie de ce questionnaire cherche à mettre en évidence les attentes des participants en terme de nouvelles méthodes et outils d'assistance à mettre en place pour la maîtrise de la lumière naturelle (Cf. Tab 5).

i	Avez-vous le sentiment que vous maîtrisez le comportement de la lumière naturelle dans vos projets
ii	Pour décrire ou parler de la lumière naturelle dans un projet, quels termes utilisez-vous?
iii	Pensez-vous que la lumière naturelle peut influencer vos projets d'architecture?
iv	Quels outils ou méthodes d'assistance utilisez-vous?
v	Dans quels domaines?
vi	Quels logiciels d'assistance utilisez-vous?
vii	A quelles étapes de conception de votre projet?
viii	Pourquoi avez-vous utilisé ces logiciels?
ix	L'interface de ces logiciels est-elle adaptée à vos besoins?
x	Quels types d'interventions ces logiciels vous ont-ils permis de faire?
xi	Si on vous propose une nouvelle méthode ou un outil d'assistance à la conception dans le but de vous aider à intégrer la lumière naturelle dans vos projets d'architecture, selon vous, cette méthode doit:...

Tab 5. Eléments principaux du questionnaire

La majorité des étudiants déclarent porter un intérêt à la lumière naturelle durant les étapes initiales et intermédiaires de recherche et de mise en forme de leurs projets (59% pour la phase d'esquisse et 68% pour la phase de mise en forme du projet). Cette attention porte pour 65% des étudiants sur la qualité de la lumière, pour 62% sur les ambiances globales de lumière et pour 56% sur la quantité de lumière qu'ils cherchent à produire dans leurs projets. La maîtrise de ces différents aspects est affirmée par 57% des étudiants alors que le reste déclare ne pas avoir une connaissance suffisante de la lumière naturelle. Le faible niveau de maîtrise est principalement justifié par le manque d'expérience des étudiants.

Les étudiants interrogés déclarent faire appel aux méthodes et outils de type logiciels (66%), références (60%) et documents techniques (37%). Ces derniers sont utilisés majoritairement afin de porter une assistance dans la maîtrise de la lumière naturelle (90%), de la structure (53%), du comportement thermique (43%) ainsi que du profil environnemental (30%). Le recensement des logiciels utilisés montre que tous les étudiants se servent des logiciels de représentations et de modélisations classiques (2D et 3D) ainsi que quelques des logiciels de simulations. La connaissance et l'utilisation de ces derniers sont les résultats de l'intégration de ces logiciels comme *Dialux*®, *Pleiades+Comfie*® et *Eco-Mod*¹⁸ (Gholipour, 2011) dans le cadre de formations spécialisées proposées

¹⁸ <http://www.crai.archi.fr/eco.mod/eco.mod/N1Accueil.html>

par l'ENSAN. L'utilisation de ce type de logiciel d'assistance est répartie sur les différentes phases du processus de conception. Cette répartition dépend particulièrement des activités proposées par ces logiciels (idéation, évaluation, simulation et optimisation) et des potentialités d'utilisation (modélisation et saisie paramétrique des données) ainsi que le niveau de précision des entrées et des résultats manipulés (Cf. Tab 6).

Début	En cours	Fin
Archiwizard	Dialux	Archiwizard
Eco-Mod	Pleiades+Comfie	Radiance
Velux-Visualizer	ECO Designer	Dialux
Dialux	Energy Plus	Pleiades+Comfie
	Velux-Visualizer	
	Eco-Mod	

Tab 6. Répartition de l'utilisation des logiciels selon les étapes de conception du projet (MA Gallas, 2011)

Cette enquête montre que les logiciels d'assistance à la conception sont utilisés principalement pour la validation de choix de conception (57%) et l'évaluation du comportement de configurations architecturales ou techniques (48%). Ce constat confirme les résultats issus des recherches bibliographiques que nous avons analysés dans ce mémoire. Ces logiciels participent pour 48% des étudiants aux activités de recherche et de formalisation des idées de conception. Enfin, pour 24% des étudiants, ces logiciels permettent de chercher des solutions par rapport aux problèmes de conception (Cf. Fig 95).

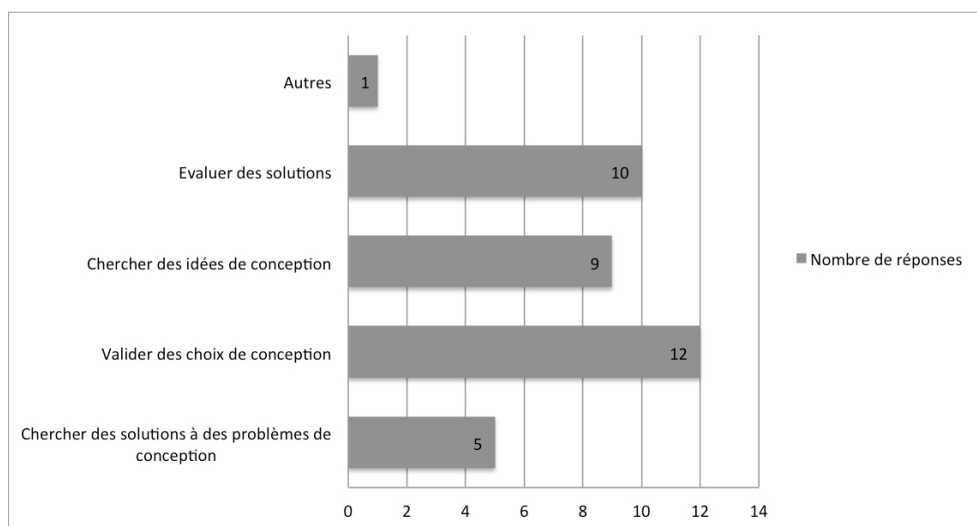


Fig 95. Objectifs d'utilisations des logiciels d'assistance à la conception

Les réponses des étudiants soulignent la complexité et l'inadaptation des interfaces de certains logiciels de simulation par rapport aux besoins et aux exigences de la pratique de la conception architecturale. Cette enquête a permis d'identifier les types de représentations des résultats considérés par les étudiants comme adaptés à leurs attentes et favorables à l'assistance à la conception architecturale. La représentation des résultats sous le format de tableaux ou de plages de valeurs est

considérée comme peu et moyennement adaptée par les étudiants. Ce constat est moins mitigé pour les graphiques de type radar, camembert ou histogrammes qui sont considérés comme moyennement adaptés par la plupart des participants à l'enquête.

Par contre, les représentations tridimensionnelles de type photo réaliste ou en fausses couleurs sont, pour la majorité des étudiants, favorables pour assister l'activité de conception architecturale (Cf. Fig 96).

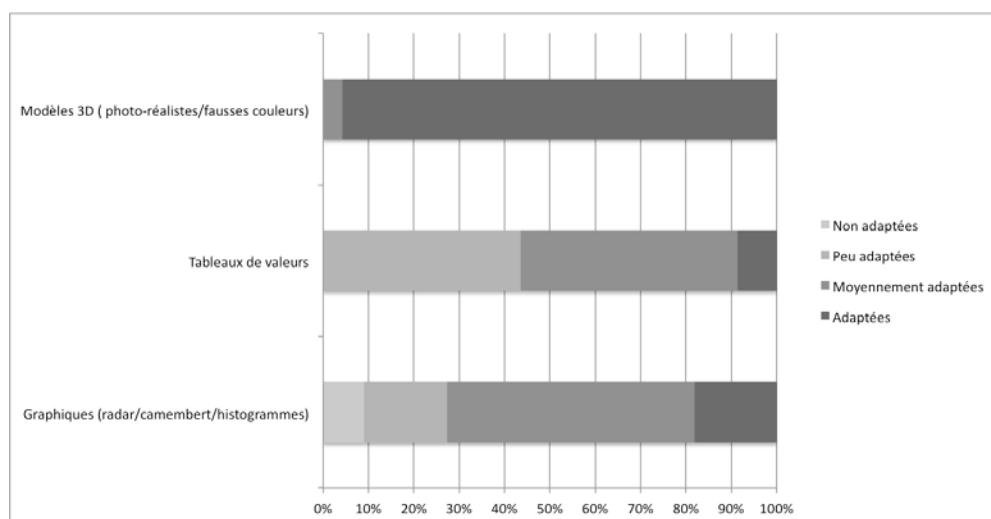


Fig 96. Les modes de représentations des outils d'assistance et leurs niveaux d'adaptations à la conception architecturale (MA Gallas, 2011)

La dernière partie du questionnaire met en valeur les attentes des étudiants en matière d'assistance à la maîtrise des ambiances lumineuses. Ces attentes se focalisent particulièrement sur une assistance plus intégrée au processus conceptuel permettant d'accompagner le concepteur durant les phases de genèse et de développement du projet.

Ces méthodes et outils doivent respecter les propriétés qui caractérisent les phases conceptuelles en intégrant des données d'entrées de faible niveau de complexité. Cette démarche consiste considérer les intentions comme un type de données d'entrées tout en intégrant des possibilités d'entrées de données plus complexes adaptées aux phases avancées du projet (Cf. Fig 97).

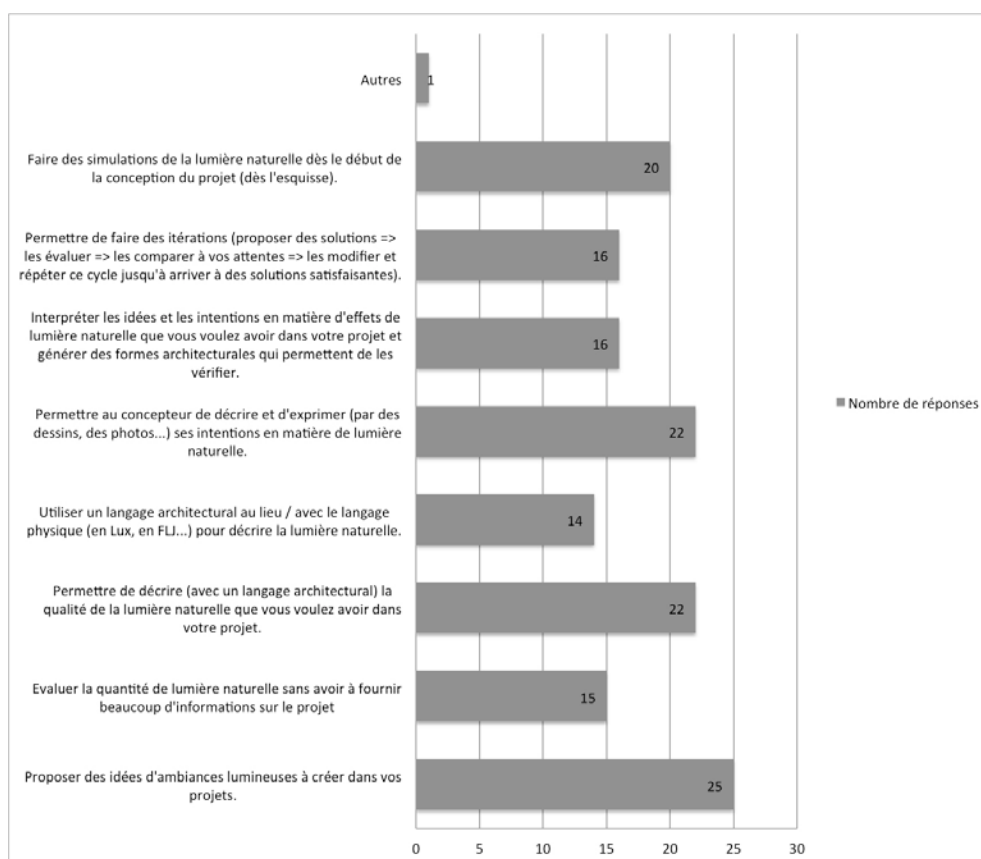


Fig 97. Attentes des étudiants en matière de méthodes et d'outils d'assistance à la conception (MA Gallas, 2011)

2.3 Les méthodes d'assurances et la recherche

Nous cherchons à définir, à travers cette partie, l'état de participation et d'intégration des méthodes et des outils d'assistance du point de vue des chercheurs travaillant dans le secteur de développement des outils d'assistance à la conception et particulièrement les outils d'optimisation des comportements physiques (lumière, thermique et acoustique). Cette évaluation se base sur une série d'entretiens réalisés avec ces chercheurs afin de définir les écarts, les besoins et les problèmes liés à l'intégration et à l'utilisation des outils d'optimisation dans la conception architecturale (Attia, 2012). Ils ont été choisis à partir de la liste des publications de la conférence IBPSA¹⁹ entre 1995 et 2010 ainsi que de la liste des membres de l'agence internationale de l'énergie²⁰. Ces participants ont des profils mixtes associant plusieurs types de compétences :

- scientifiques : chercheur et développeur de méthode et d'outil d'assistance à la conception,
- académiques : enseignant dans le domaine de l'assistance à la conception,
- professionnelles : prestataire de services d'optimisation du comportement physique de projet de conception de bâtiment (thermique, lumière et acoustique).

¹⁹ International Building Performance Simulation Association

²⁰ International Energy Agency (IEA) Task 40

Cette étude est structurée suivant un modèle d'interview semi-dirigé composé de cinq parties. Une première partie intègre des questions permettant de dresser le profil exact des experts en mettant en évidence leurs qualifications scientifiques et professionnelles. La deuxième partie s'intéresse aux méthodes de travail et de développement suivies par les experts. Cette partie essaye de définir le type d'assistance choisi par ces experts ainsi que le moment de leur intervention dans le processus de conception. Enfin, la dernière partie de cette enquête cherche à constituer un retour d'expériences de ces experts pour la mise en place de pistes de développement pour les futures méthodes d'assistance garantissant une meilleure adaptation et intégration au processus de conception architectural et particulièrement ses phases conceptuelles.

Le résultat de ces interviews conforte les résultats des enquêtes réalisées avec les professionnels de la conception architecturale et les architectes en formation dans la mesure où ils affirment le manque et la difficulté d'intégration des outils d'assistance à la conception (dont les outils d'optimisation) dans la pratique. Ces experts déclarent que cette utilisation se limite à des projets pilotes collaboratifs faisant intervenir des spécialistes en optimisation et des architectes. Ils justifient cette situation par le manque d'intérêt des maîtres d'ouvrages pour l'intégration de ce type de méthodes dans le processus d'élaboration des projets. Cette situation est expliquée par l'absence de formation et de sensibilisation des architectes à l'apport et à l'utilisation de ces méthodes considérées comme des méthodes mathématiques complexes et non opérationnelles dans un contexte de conception réel. Les méthodes d'optimisation sont marquées par des interfaces d'utilisations, une prise en main et une visualisation des résultats très complexes dont la maîtrise et la compréhension sont réservées à un public d'initiés.

Ces propriétés créent des obstacles qui limitent la diffusion et la démocratisation de l'utilisation des méthodes d'optimisation auprès des architectes. Les experts questionnés proposent des pistes et des perspectives permettant de favoriser l'intégration des méthodes d'assistance au processus créatif. Ces derniers soulignent :

- l'importance de l'intégration des méthodes d'optimisation utilisant des modèles numériques génératifs dans le cadre de l'enseignement de l'architecture,
- développer la mise en place de méthodes d'optimisation adaptées aux phases conceptuelles des projets,
- réduire le temps de calcul des méthodes d'assistance utilisant des modèles de simulation et des modèles génératifs,
- améliorer l'interface de méthodes génératives pour les rendre plus accessibles à un public de non-initiés,
- créer des outils génératifs d'optimisation qui garantissent plus d'interactions avec les utilisateurs pour modifier les paramètres d'entrées et les objectifs à atteindre.

3. Synthèse

Nous avons identifié dans cette partie différentes familles de méthodes et d'outils d'assistance appliqués à la conception architecturale et plus particulièrement la maîtrise de la lumière naturelle. Ces méthodes ont été groupées selon le type de support utilisé en essayant de mettre en évidence les potentialités et les limites de chacune. Nous avons essayé ensuite d'évaluer le mode de participation et d'intégration des méthodes existantes dans le processus de conception. Cette évaluation a donné lieu à nouvelle classification prenant comme référence les activités d'assistance et non pas le type de support des méthodes d'aide à la conception. Nous proposons ainsi deux classes, les « *méthodes adaptées aux phases avancées* » dont la fonction, se limite à la vérification et la validation de choix de conception alors que les « *méthodes adaptées aux phases conceptuelles* » couvrant un champ plus large et à différentes étapes du processus de conception. Elles proposent une aide à la génération, formalisation d'idées et de solutions architecturales en réponse à des intentions ou à des contraintes.

Nous avons ensuite évalué le degré de participation et d'intégration des méthodes d'assistance à la conception dans la pratique de la conception en architecture. C'est une évaluation globale qui a intégré les différents acteurs de la conception architecturale à savoir, les professionnels, les étudiants ainsi que les chercheurs et experts en utilisation et développement de méthodes d'assistance. Ces évaluations ont pris la forme de questionnaires permettant d'identifier les causes du faible niveau d'intégration des méthodes et des outils d'assistance à la conception dans la démarche conceptuelle ainsi que le besoin d'assistance pendant les phases conceptuelles du projet. Ils ont permis aussi de dégager le besoin de mise en œuvre et de développement de nouvelles méthodes conçues pour les architectes et assurant un accompagnement du projet particulièrement pendant les phases les plus complexes et les plus déterminantes de l'évolution du projet à savoir les phases conceptuelles.

Partie B. Vers une méthode d'assistance à la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases conceptuelles du projet d'architecture

Chapitre I. Structure de la méthode d'aide à la conception

La première partie de ce mémoire de recherche a essayé d'établir une lecture globale de la question de la relation qu'entretient la lumière naturelle, dans sa dimension physique et sensible, avec l'architecture et la conception architecturale. Cette étude a permis d'aborder la question de l'assistance à la conception et particulièrement celle de l'intégration des ambiances de lumière naturelle durant les phases amont. Nous avons mis en évidence les types et les classes de méthodes et d'outils d'assistance à la conception et leurs niveaux d'adaptation aux exigences liées à la prise en compte de la lumière naturelle en phases conceptuelles du projet. À partir des résultats de cette première partie, nous proposons des pistes de structuration et de développement d'une méthode d'aide à l'intégration de la lumière naturelle capable d'accompagner la conception dès les phases préliminaires. Cette méthode d'assistance utilise les intentions d'ambiance de lumière naturelle du concepteur comme données principales pour générer des réponses architecturales vérifiant ces intentions. Cette deuxième partie a comme objectif de préciser la nature, la structure, les activités, les tâches et les composantes de la méthode proposer. Nous décrivons aussi le mode d'implémentation de cette méthode dans un outil d'assistance en détaillant les environnements logiciels et acteurs participant à la mise en œuvre de ce prototype. Nous portons une attention particulière à la définition et la caractérisation des données, des méthodes de calcul, de génération et d'évaluation intervenant dans le processus de fonctionnement du prototype proposé.

1. Description de la méthode

Notre travail de recherche s'intéresse particulièrement à la problématique d'intégration des effets de la lumière naturelle durant les phases initiales. Ces phases sont caractérisées par une dualité entre le manque d'informations et la volonté de chercher des idées de solutions. Ces solutions doivent vérifier les intentions du concepteur et répondre aux contraintes du projet. Les choix faits et les décisions prises durant les phases conceptuelles déterminent le mode de développement du projet d'où la nécessité de mettre en place une méthode capable d'accompagner le concepteur à ce moment précis du processus créatif.

Nous proposons ainsi une méthode d'assistance capable d'intégrer les contraintes liées à la lumière naturelle en tenant compte des propriétés des étapes initiales du processus de conception. L'objectif est d'accompagner le concepteur dès le début de sa démarche créative et de l'aider à choisir les meilleures pistes pour le développement de ses idées de conception. Cette démarche garantit un premier niveau de conformité des choix de conception par rapport aux contraintes rencontrées. En utilisant cette méthode, le concepteur peut figer les aspects déterminant de son projet et continuer sa démarche de conception avec une certaine confiance dans la validité des choix qu'il a fixés, lui permettant ainsi d'aborder d'autres problématiques plus complexes durant les phases avancées de conception. Nous avons déterminé, dans la première partie, que les phases initiales sont caractérisées par la disponibilité d'une faible quantité d'informations caractérisées par un aspect flou et imprécis. Ces informations prennent la forme d'intentions, d'idées et de choix de conception de faibles niveaux de détails matérialisés par des textes, des images et des dessins. L'étude des méthodes d'assistance à la conception montre que la majorité des outils proposés et utilisés dans la pratique de la conception architecturale ne prend pas en compte ce type de données. Certaines méthodes expérimentales issues de travaux de recherches ont essayé d'intégrer ce type d'informations, mais les solutions proposées restent à l'état de prototype avec des fonctions et des usages très limités.

La méthode d'assistance que nous proposons est structurée selon le processus préconisé dans les méthodes de modélisation déclarative. Il est organisé autour de trois phases principales ; *déclaration des intentions*, *génération de solutions* et *prise de connaissances*. Le choix de cette méthode est justifié par l'analogie qui existe entre le processus de modélisation déclaratif et le processus cognitif de la conception architecturale durant ces phases initiales. Cette méthode crée un environnement virtuel d'échange avec le concepteur intégrant les intentions du concepteur comme données d'entrée caractérisées par un aspect flou et imprécis. Ces données sont exprimées sous un format graphique ou littéral adapté aux phases conceptuelles du projet. La méthode permet ensuite d'intégrer des données plus précises et plus complexes disponibles à des phases avancées de la mise en œuvre du projet. Le but est d'aider le concepteur à déclarer ses intentions d'effets de lumière d'une manière simple et intuitive.

La première étape de « *déclaration des intentions* » utilise un langage visuel à base d'images de références. Ces images représentent des configurations architecturales issues de projets portant une attention particulière à la lumière naturelle et générant des effets clairs et identifiables (Cf. Fig 98). La deuxième étape d'« *identification et caractérisation des intentions* » réalisées par le système consiste à reconnaître et à caractériser les types d'effets de lumière décrits par le concepteur afin de les reproduire dans un cadre spatial. Cette caractérisation consiste à traduire les caractéristiques visibles et perceptibles des effets identifiés en données mesurables et évaluables afin de les mettre sous la forme de fonctions exprimant des objectifs. L'étape de caractérisation fait appel aux différentes notions abordées dans la première partie de mémoire portant sur la connaissance physique et sensible de la

lumière naturelle ainsi que sur les différentes méthodes alliant ces deux domaines. La phase suivante est celle de « *génération des solutions* » qui fait appel aux résultats de caractérisation des intentions afin de générer des solutions architecturales présentant plusieurs niveaux de correspondance par rapport aux intentions décrites. Cette étape fait appel à des fonctions de génération, d'optimisation et d'évaluation qui considère la caractérisation des intentions comme un objectif à atteindre et à vérifier. Chaque configuration générée est soumise à une évaluation pour vérifier son niveau de conformité à la fonction objectif qui caractérise l'intention décrite par le concepteur. Seules les configurations présentant un comportement proche de celui défini par la caractérisation des intentions sont gardées pour être soumises au concepteur, les autres sont rejetées.

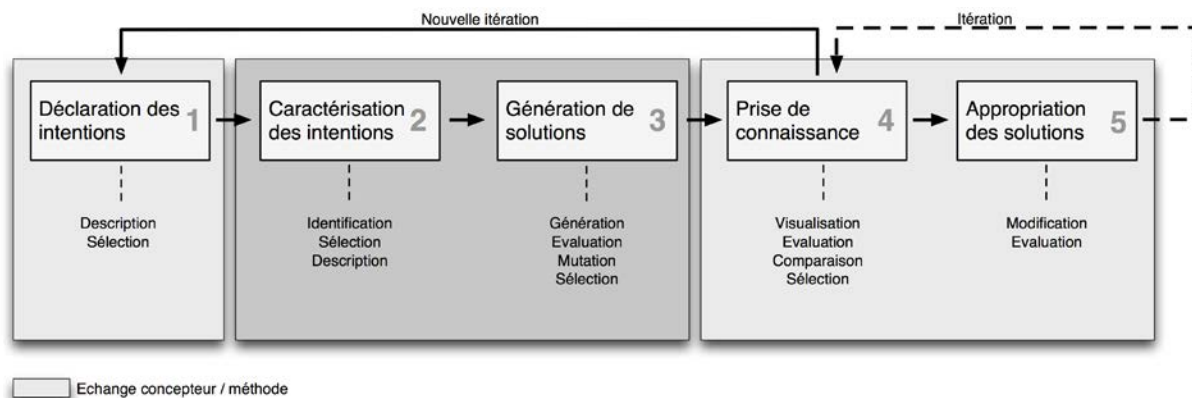


Fig 98. Processus de la méthode proposée

La quatrième étape de « *prise de connaissance* » consiste à soumettre les solutions générées à l'évaluation du concepteur. Ce dernier peut vérifier la validité et la conformité des solutions par rapport à ses attentes et aux différentes contraintes posées. Des fonctions d'évaluation sont intégrées à la méthode pour aider le concepteur dans sa tâche d'appréciation du comportement des solutions proposées. Les évaluations de type sensible cherchent à vérifier si les effets de lumière générés par les solutions correspondent aux intentions et aux attentes déclarées par le concepteur. Par contre, les évaluations de type physique cherchent à comparer le comportement lumineux des configurations proposées par rapport aux normes imposées au projet. Cette étape comporte aussi des fonctions qui, à partir des résultats des évaluations, offrent la possibilité de comparer certaines solutions selon des critères de natures physiques et sensibles.

Notre méthode d'aide la conception crée une transition entre l'état flou, imprécis et immatériel des idées du concepteur et l'aspect concret et matériel des solutions proposées. Ces solutions constituent des pistes potentielles pour le développement du projet créant un premier niveau de formalisation des idées du concepteur et réduisant la complexité inhérente à la maîtrise des effets de lumière naturelle durant les phases préliminaires de conception. Elles créent aussi un premier niveau de vérification, de validation et de conformités aux exigences architecturales et aux normes techniques imposées aux

projets. L'étape de « *prise de connaissance* » se conclut par la sélection d'une ou de plusieurs solutions ayant un comportement qui correspond aux attentes et aux critères définis par le concepteur.

La dernière étape d' « *appropriation des solutions* » offre des fonctions de modification des propriétés géométriques et physiques des solutions générées par la méthode et sélectionnées par le concepteur. Elle fait appel aux méthodes d'évaluation afin de vérifier et de déterminer le poids de ces modifications sur les configurations obtenues. L'ensemble de ces fonctions définit un processus d'appropriation itératif et évolutif des résultats proposés par la méthode de génération.

2. Déclaration des intentions

Les intentions de lumière naturelle sont exprimées en référence à la dimension visuelle et perceptible de lumière dans l'espace architectural. Le texte, le dessin (technique et artistique) et l'image sont les formats récurrents chez les architectes en particulier durant les phases de recherche d'idées du projet. Ces formats peuvent avoir des fonctions de retranscription et de représentation d'une sensation éprouvée lors d'une visite d'un lieu présentant un effet de lumière naturelle remarquable. Ils peuvent aussi constituer une description de l'image mentale d'un effet de lumière imaginée par le concepteur pour son projet. Des méthodes de modélisation déclaratives ont utilisé ces formats comme moyen de description des intentions. Le texte, le dessin et l'image sont ainsi capables de représenter et de donner forme à des idées ou à des sensations non quantifiables. Les interactions entre les différents formats de représentations des effets de lumière naturelle et le concepteur permettent l'émergence des idées et des intentions en rapport avec son contexte de conception.

A la différence des autres formats, l'image est une trace et une empreinte d'effet réel qui offrent la possibilité de « *geler le temps, d'enregistrer l'instant magique où la lumière et l'espace sont une seule et même chose* » (Baltanas, 2005). Ce support présente un haut niveau de fidélité par rapport à la réalité qu'il représente tout en subissant une part de subjectivité due à l'expérience, la sensibilité et la culture du photographe. Le texte et le dessin sont dépendants des compétences, de la culture artistique et littéraire du rédacteur ou du dessinateur et des styles utilisés pour les créer. Ces derniers nécessitent aussi une connaissance des codes de la représentation graphique et de l'expression écrite pour lire et interpréter les messages véhiculés par le dessin et le texte alors que l'image permet une lecture immédiate et directe sans nécessiter d'interprétation.

« Le mode de penser par images, dans un projet, est toujours totalisant. Par sa nature même en effet, l'image nous montre la totalité de l'extrait d'une réalité envisagée par la pensée : parois et sols, plafonds et matériaux, atmosphère lumineuse et couleurs d'une pièce, par exemple. Et nous voyons tous les détails de la transition entre le plancher et la paroi, entre la paroi et la fenêtre, comme au cinéma. » (Zumthor, 2008)

L'image photographique est alors un support de représentation caractérisé par un haut niveau de conformité par rapport à la réalité de l'élément représenté assurant une capacité de lecture et d'interprétation instantanée. Ces propriétés donnent à l'image photographique un pouvoir d'« évocation » de phénomènes éphémère et visible comme les effets de la lumière naturelle nécessaire pour la genèse, la formulation et le développement d'idées dans un cadre de conception (Salma Chaabouni, 2011). La capacité heuristique des images photographiques a motivé notre choix pour ce support comme moyen de description et de déclaration des intentions portant sur la lumière naturelle intégrée à une méthode d'assistance à la conception en phase amont du projet.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la lecture d'une image photographique peut être influencée par des facteurs en rapport avec le contenu de l'image, son mode de réalisation et les objectifs du photographe. Ces différents facteurs nous obligent à déterminer des critères de sélection des images à utiliser pour notre méthode d'assistance à la conception. Ces critères doivent vérifier les objectifs de la méthode, en garantissant :

- une lecture claire de l'effet ou de l'association de plusieurs effets représentés par l'image : les effets de lumière doivent être clairement identifiables sans effort particulier de la part de l'observateur. Cet objectif suppose une focalisation de l'image sur l'effet de lumière qui doit être le seul centre d'intérêt présent et occupant la majeure partie du cadre de vue.
- une lecture spatiale de la lumière naturelle : l'image doit représenter clairement la source de lumière, son mode de projection et de propagation dans l'espace architectural intérieur et l'aspect qu'elle donne aux différentes surfaces.
- une neutralité dans la représentation en évitant tout les types d'obstacles physiques qui gênent la lecture et l'appréciation des effets de lumière. Ces images doivent intégrer des effets de lumière naturelle sans aucune influence de type lumière artificielle ou éclairage d'appoint pour la prise de photographie. Les images ne doivent pas avoir subi de post traitement de type modification des niveaux de luminosité et de contraste ou d'application d'effet de style ou de filtre.

Les images doivent assurer une diversité et une variation des effets de lumière représentés représentatives de la richesse de la lumière naturelle et de son rapport à l'architecture en essayant de couvrir différents moments de la journée, différentes conditions d'éclairage et dans des contextes géographiques et culturels différents. L'application de ces critères de sélection d'images permet la collecte d'images capables de supporter la fonction de déclaration des intentions du concepteur. Grâce à une telle collection d'images, le concepteur peut déclarer et formuler ses intentions en sélectionnant des images représentant des effets de lumière qui l'intéressent.

Le choix des images peut être expliqué par deux raisons. D'un côté, ces images constituent une première interprétation formelle et matérielle d'une idée ou d'une intention que le concepteur a déjà

imaginée et qu'il cherchait à formaliser. D'un autre côté, elles suggèrent un ou plusieurs types d'effets ou de comportements de lumière naturelle qui correspondent aux attentes du concepteur et peuvent vérifier les contraintes liées à la fonction de l'espace architectural à concevoir. Ainsi, la déclaration des intentions a une double fonction, une première de création et de génération d'idées et d'intentions et une deuxième de formalisation et de description de ces dernières.

La première étape de notre méthode participe elle-même à l'effort d'assistance à la conception dans la mesure où elle aide le concepteur à formuler et à formaliser ses idées et ses intentions. Ce type d'assistance réduit la part de complexité qui caractérise la phase critique d'idéation considérée comme le point de départ du processus de conception architecturale.

3. Caractérisation des intentions

Les images sélectionnées forment une représentation des intentions du concepteur. Ils nécessitent un travail de caractérisation pour permettre à la méthode de proposer des solutions qui vérifient ces intentions. La première étape de la phase de caractérisation consiste à identifier et reconnaître la dimension sémantique des choix d'images et en extraire les types d'effets de lumière que le concepteur cherche à créer. La deuxième étape doit définir une description physique des effets de lumière capable d'être interprétée et traduite par la méthode sous la forme de configurations architecturales.

3.1 Caractérisation sémantique

La dimension sémantique du résultat de la sélection des images est déterminée par l'exploitation de l'indexation des images sélectionnées. Rappelons qu'une méthode d'indexation intègre un ensemble de pratiques qui mettent en évidence la description sémantique d'un document et favorisent l'accessibilité à son contenu. Elle ne considère pas seulement le document comme une entité distincte, mais aussi comme un ensemble des éléments d'information qui s'y trouve (Vézina, 1998).

Une méthode d'indexation est définie comme étant « *l'opération qui consiste à décrire et à caractériser un document à l'aide de représentations des concepts évoqués dans ce document, c'est-à-dire à transcrire en langage documentaire les concepts après les avoir extraits du document par une analyse* » (AFNOR, 1993). Dans son travail de thèse, Salma Chaabouni (Salma Chaabouni, 2011) propose une méthode d'indexation sémantique d'images de référence d'ambiance de lumière naturelle utilisant des mots clés pour décrire le contenu de l'image sous différents angles en faisant appel à des notions comme la fonction de l'espace représenté, le dispositif d'éclairage utilisé ou le type de lumière présent. Ces notions, représentant plusieurs dimensions architecturales, constituent une partie des facettes d'un thésaurus structurant l'ensemble des mots clés. L'une des facettes qui nous intéressent est celle des « *effets de lumière* » qui décrit le type de lumière représenté sur chacune des images

indexées. Cette facette intègre une liste, non exhaustive, de mots clés représentant les types d'effets de lumière qu'on peut rencontrer dans un espace architectural. Les types d'effets de lumière naturelle utilisés pour cette facette sont issus d'un travail d'identification et de classification que nous avons réalisé à partir de l'analyse d'œuvres architecturales, artistiques et cinématographiques (Cf. Partie A.Chapitre II.2) ainsi que des travaux de recherche (Cervantès, 2012 ; Ciriani, 1991 ; Mohamed-Anis Gallas, 2009 ; Lassance, 1998 ; Reiter, De Herde, 2004). L'analyse de cette collection de références a été réalisée selon les critères de classification suivant :

- le mode de répartition de la lumière naturelle à l'intérieur de l'espace architectural : le but est d'identifier la position des zones éclairées par la lumière naturelle et la distance qui les sépare de la source d'éclairage.
- la proportion entre zones éclairées et zones sombres : évaluer la proportion entre les zones fortement ou moyennement éclairées et les zones totalement sombres.
- la présence ou l'absence de taches solaires et l'évaluation de leurs tailles.
- la direction des rayons de soleil : identifier si la lumière incidente a une direction unique claire et bien définie ou bien si c'est une lumière diffuse qui se propage d'une manière omnidirectionnelle.
- Le niveau d'illumination global : donner une échelle au niveau d'illumination de la pièce, très éclairée, moyennement éclairée et faiblement éclairée.
- Le type de lumière : identifier si la lumière incidente est très précise et capable de révéler les textures et les détails de la pièce ou c'est une lumière floue rendant les limites entre les surfaces et les objets invisibles.

Le résultat de ce travail d'analyse a permis de proposer une classification des types d'effet de lumière naturelle structurée en deux niveaux hiérarchiques. Un premier niveau supérieur qui détermine les types majeurs d'effets et un deuxième niveau inférieur de sous types d'effets qui partagent des propriétés avec l'un des types du premier niveau.

Nous avons ainsi défini et décrit de nouveaux types d'effet de lumière et détaillé la définition et la description des types déjà identifiés dans le cadre d'autres travaux. Nous avons essayé de chercher l'existence ou non de sous types d'effets pour chaque effet retenu. Chaque type et sous type d'effet de lumière possède un nom qui résume les principales caractéristiques de l'effet de lumière. Quatre types d'effet de lumière de premier niveau sont ainsi identifiés : lumière uniforme, lumière rasante, lumière englobante et lumière contrastée (Cf. Fig 99). Le dernier type est divisé en trois sous types de niveau inférieur constituant ainsi les effets de lumière contrastée : taches solaires, clairière et fond de pièce.

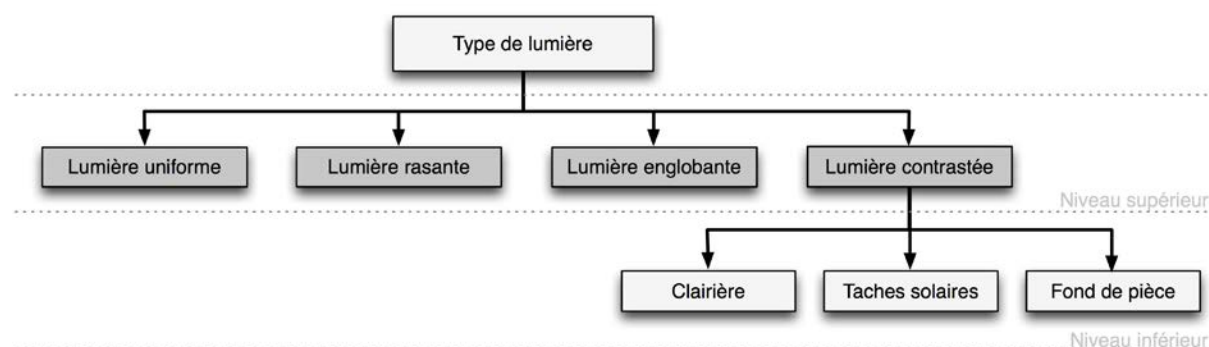
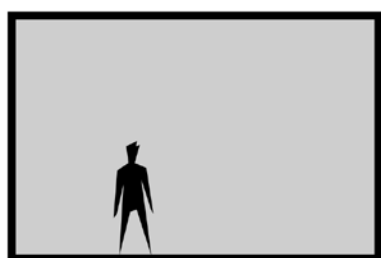


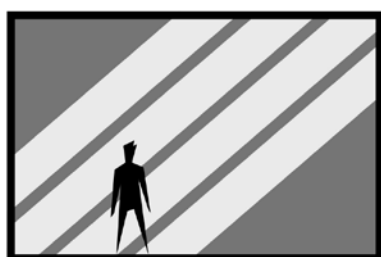
Fig 99. Classification des effets de lumière naturelle en milieu architectural

• La lumière uniforme :



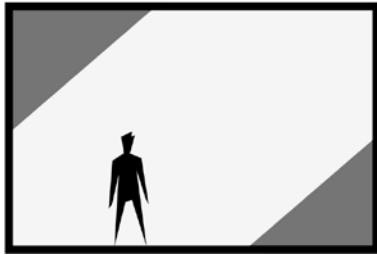
La lumière uniforme est une lumière omnidirectionnelle qui ne donne aucune indication sur la position de la source d'éclairage. Elle correspond à un éclairage indirect et diffus réparti d'une manière uniforme et constante sur toutes les surfaces qui composent l'espace architectural. Ce type d'effet ne crée aucun contraste entre les zones ni entre les surfaces de l'espace intérieur. La lumière de type uniforme ne crée pas de trace d'ombre précise, mais plutôt une ombre floue très légère. Ce type d'effet ne génère pas de taches solaires ni sur le sol ni sur les parois verticales de l'espace puisqu'il n'existe pas de rayonnement solaire incident direct. La lumière uniforme fait référence à la lumière des ateliers d'artistes ayant de grandes ouvertures orientées au Nord et générant une lumière neutre sans direction, sans ombre, sans contraste et de couleur blanche.

• La lumière rasante :



La lumière rasante est une lumière d'incidence directe avec un angle assez bas qui permet aux rayons lumineux de parcourir et d'occuper la totalité de l'espace intérieur. Ce type de lumière crée un découpage des rayons incidents produisant des taches solaires de grandes tailles qui se projettent sur la totalité des surfaces (horizontales et verticales) qui composent l'espace architectural. La lumière rasante crée un faible contraste entre des surfaces de grandes tailles et fortement éclairées et des surfaces très sombres et de tailles très réduites. Ce type d'effet peut générer une ombre très franche dont les limites sont précises. La lumière rasante génère un éclairage ciblé de très forte intensité qui révèle la texture des surfaces et des objets de l'espace architectural. Elle fait référence à la lumière produite au lever ou au coucher du soleil dans des espaces possédant des ouvertures multiples de tailles moyennes et orientées au sud.

- **La lumière englobante**



La lumière de type englobante crée une lumière directe de très forte incidence qui irradie la totalité de l'espace architectural. Le mode de propagation et de répartition de la lumière englobante est le même que celui de la lumière uniforme. La seule différence entre ces deux types d'effets est au niveau de l'intensité du rayonnement lumineux qui est largement supérieure pour la lumière englobante. Cet effet

crée un trop plein de lumière et une clarté qui ressemble à celle de l'éclairage extérieur supprimant ainsi les limites et dressant une continuité entre les conditions d'éclairage de l'environnement extérieur vers l'espace intérieur. Les notions de contraste et d'ombre sont absentes donnant l'impression que la lumière naturelle entoure l'ensemble de l'espace. L'effet de lumière englobante rappelle la lumière produite dans les serres ou dans les espaces possédant de grandes surfaces vitrées horizontales.

- **La lumière contrastée**

Ce type d'effet de lumière naturelle est caractérisé par un contraste entre deux zones spatiales, une première fortement éclairée et une deuxième très faiblement éclairée. Le contraste génère un éclairement global assez faible créant une atmosphère de pénombre. La position des différentes zones et leurs tailles ainsi que le mode de transition entre l'état éclairé et l'état sombre déterminent les sous types d'effets de la lumière contrastée.

- o **La lumière contrastée - clairière**

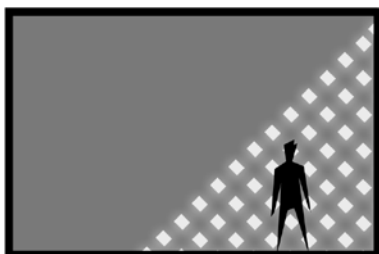


Elle crée un écart entre une première zone spatiale fortement éclairée et de surface réduite occupant le centre ou l'un des coins de l'espace architectural et une deuxième zone occupant le reste de l'espace avec un niveau d'éclairement très faible. La transition entre les zones éclairées et les zones sombres est très brusque

passant directement d'une clarté abondante à une obscurité totale. Cet effet crée un centre d'intérêt et dirige l'attention en concentrant les apports solaires vers un point ou une zone particulière de l'espace architectural. La lumière contrastée-clairière isole l'occupant de son environnement immédiat en excluant l'extérieur pour créer un espace de recueillement de méditation déterminé par la position de la source et la direction du rayonnement lumineux. Cet effet fait référence aux espaces religieux caractérisés par de grands volumes éclairés par une source ponctuelle de surface réduite et de position très haute qui dirigent

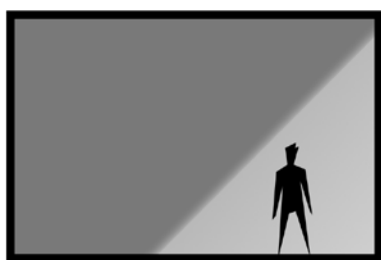
le regard vers le ciel. Il génère une seule tache solaire, ponctuelle et de taille réduite, qui parcourt l'espace intérieur suivant le mouvement du soleil.

o La lumière contrastée - taches solaires



Elle génère un contraste entre des surfaces ponctuelles de taille très réduites extrêmement éclairées et le reste de l'espace intérieur ayant un éclairage très faible. Les surfaces éclairées constituent des taches solaires dont la forme et la taille dépendent de celles des ouvertures qui les modèlent. Les taches solaires peuvent avoir des contours précis bien délimités se projetant sur les surfaces intérieures de l'espace. Ces motifs sont le résultat d'une lumière directe avec un angle d'incidence assez bas et une très forte intensité. Plus ces taches sont claires plus le contraste est fort. Ils peuvent être répartis d'une manière régulière ou aléatoire sur l'ensemble des surfaces intérieures de l'espace architectural selon la position des ouvertures. Les taches solaires peuvent aussi avoir des contours flous et diffus, localisés au niveau des surfaces d'ouvertures sans se projeter sur le reste des parois. Ces taches diffuses et souvent éblouissantes sont le résultat d'un apport lumineux direct caractérisé par un angle d'incidence assez haut ou provenant de surfaces d'ouvertures orientées au nord. Ils peuvent aussi être le résultat d'une lumière incidente indirecte et diffuse obtenue à travers des dispositifs d'éclairage indirects ou des surfaces vitrées translucides.

o La lumière contrastée - fond de pièce



Elle divise l'intérieur de l'espace en deux zones complètement distinctes. Une première zone située à proximité des sources d'éclairage caractérisée par un apport lumineux assez important et une deuxième zone très sombre occupant le reste de l'espace. Le mode de transition entre ces deux zones peut être brusque avec des limites franches et bien précises ou bien progressif avec des limites floues et diffuses. La transition d'un état clair à un état obscur est déterminée par les propriétés de réflexion et de diffusion des parois intérieures. Le niveau de contraste qui caractérise ce type d'effet est déterminé par le mode de transition entre l'état clair et l'état obscur ainsi que le rapport de proportion entre les surfaces respectives des deux zones.

3.2 Caractérisation physique

Dans le but de permettre à la méthode d'assistance, que nous proposons, d'interpréter la description sémantique des intentions du concepteur en solutions architecturales, nous avons mis en place une méthode de caractérisation physique des effets de lumière naturelle. Cette méthode de caractérisation a comme objectif de rendre quantifiables et mesurables les types d'effets de lumière identifiés.

Pour permettre cette étape de la concrétisation des intentions du concepteur en solutions, nous avons fait appel à un ensemble d'indicateurs (Mohamed Anis Gallas et al., 2010). Ces derniers décrivent un ensemble de caractéristiques en rapport avec l'effet de lumière lui-même, la configuration architecturale et les propriétés de l'environnement extérieur qui ont permis de le générer (Cf. Tab 7). La nature de ces indicateurs est variée. Ils peuvent prendre la forme de valeurs physiques pour décrire le niveau d'éclairement, le niveau de contraste ou encore le mode de répartition et de propagation des apports solaires. Ils décrivent également les propriétés de l'espace architectural et les composantes qui influence la captation et la distribution des apports lumineux comme la taille, la position, le type, la position des ouvertures et les indices de réflexion des parois.

Nous avons commencé ce travail de caractérisation par l'identification de l'ensemble des indicateurs ayant une influence sur le comportement lumineux d'un espace architectural. Le niveau d'influence est évalué afin de donner un ordre d'importance à chacun des indicateurs. Cette influence est évaluée selon une échelle de trois niveaux en attribuant une valeur d'appréciation pour chaque indicateur.

- « ++ » Forte influence
- « + » Faible influence
- « » Aucune influence

L'identification de ces niveaux d'influence est le résultat d'une interprétation d'un ensemble de simulations que nous avons réalisées (Cf. Partie A.Chapitre II.1.6) et de simulations issues de travaux de recherche en rapport avec la lumière naturelle et ses répercussions énergétiques (Gratia, De Herde, 2003). Nous avons cherché à identifier l'impact de chacun des indicateurs durant les phases amont de conception. Le but est de mettre l'accent sur les indicateurs à prendre en compte dans notre méthode d'assistance à la conception. Ainsi, une valeur de « 1 » est attribuée à chaque indicateur pouvant être défini durant les phases amont et une valeur « 0 » pour ceux qui sont imprécis durant cette phase et plutôt disponibles durant les phases avancées de conception.

N°	Indicateur	Niveau d'influence	Phase de conception	Détail
1	Localisation	++	1	Latitude / longitude
2	Facteur de réflexion du sol extérieur	+	0	La quantité d'énergie lumineuse réfléchie par cette surface par rapport à la quantité incidente
3	Type de ciel	++	0	Ciel couvert / dégagé / ensoleillé
4	Masque solaire	++	0	Masque extérieur naturel et artificiel
5	Coefficient de transmission lumineuse du vitrage	+	0	La fraction de lumière incidente qui traverse le vitrage
6	Indice de compacité	+	1	Compacité = Volume de l'espace / Somme des surfaces composant l'espace
7	Disposition des ouvertures	++	1	Verticales, horizontale
8	Proportion des ouvertures	++	1	Bandeau, carré
9	Position des ouvertures	++	1	Haut, bas, droite
10	Indice d'ouverture	++	1	Indice d'ouverture = S ouverture / S sol
11	Indice de profondeur	+	0	Indice de profondeur = Rapport de la hauteur utile sous linteau / la profondeur du local
12	Orientation des ouvertures	++	1	
13	Proportion des espaces	+	0	Rapport largeur/profondeur
14	Dispositif de protection	+	0	
15	Echelle de l'espace	+	1	Pièce, hall
16	Epaisseur de la façade	+	0	L'épaisseur de la façade peut changer le comportement lumineux de l'espace (peut jouer le rôle d'un masque)
17	Indice de vitrage	+	0	Indice de vitrage = S vitrée / S ouverture
18	Nombre d'ouverture	++	1	
19	Forme de l'espace	+	1	
20	Type d'utilisation	++	1	Fonction
21	Indice de contraste	++	0	Contrast C : Ratio de luminance entre deux surfaces (L0 et L1) d'un même espace intérieur.
22	Indice de chromaticité des surfaces	+	0	Caractéristique définissant la position d'une couleur dans le plan chromatique, soit par définition de ses coordonnées chromatiques, soit par définition de sa teinte et de sa saturation.
23	Facteur de réflexion des parois	++	0	La quantité d'énergie lumineuse réfléchie par cette surface par rapport à la quantité incidente
24	Facteur de réflexion du sol+Surfaces de travail	++	0	La quantité d'énergie lumineuse réfléchie par cette surface par rapport à la quantité incidente
25	Facteur de réflexion du plafond	++	0	La quantité d'énergie lumineuse réfléchie par cette surface par rapport à la quantité incidente
26	Niveau d'éclairement moyen	++	0	la quantité de flux lumineux éclairant une surface, exprimée en lumen par m² ou lux.
27	Facteur de lumière du jour moyen	++	0	Ce facteur est le rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point (généralement le plan de travail ou le niveau du sol) à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale, en site parfaitement dégagé, par ciel ouvert. Il s'exprime en %.
28	Luminance moyenne	++	0	C'est la "brillance" d'une surface éclairée ou d'une source lumineuse telle que perçue par l'œil humain, exprimée en candèlas par m² (cd/m²). Elle décrit l'effet de la lumière sur l'œil.

Environnement extérieur
 Rapport intérieur / extérieur
 Morphologie
 Environnement intérieur

++ Forte influence
 + Faible influence
 0 Phase avancée
 1 Phase amont

Tab 7. Liste des indicateurs de caractérisation des types d'effet de lumière

Cette liste d'indicateur a été utilisée pour caractériser des effets de lumière naturelle issus de projets de référence présentant un intérêt particulier pour la lumière naturelle et générant des types d'effets bien identifiés. Les projets ont été choisis à partir d'une liste d'images de références constituées lors de la mise en place de la phase de déclaration des intentions (Cf. Partie B.Chapitre I.2). Les critères de sélection des projets ont été :

- la clarté et la facilité de lecture et d'identification d'un ou de plusieurs types d'effet de lumière.
- la disponibilité d'informations (image, plan, texte) caractérisant le projet et les types d'effets de lumière qu'il génère.

La détermination des valeurs des indicateurs décrivant les aspects physiques a nécessité l'utilisation de méthodes de mesures et de quantification. Pour cela, nous avons fait appel à un logiciel de modélisation géométrique (*Rhinoceros®* + *Autocad®*) pour modéliser les espaces générant un type d'effet de lumière bien défini et des logiciels de simulation de la lumière naturelle (*Radiance®* + *Velux Visualizer®*) pour évaluer le niveau d'éclairement, le niveau de luminance, le facteur de lumière du jour et déterminer ainsi des valeurs aux indicateurs comme la moyenne d'éclairement ou l'indice de contraste (Cf. Fig 100). Cette étape nécessite des informations précises à la fois pour la modélisation géométrique des espaces (dimension, forme) et pour la configuration et le paramétrage des simulations

(taux de réflexion des parois, orientation, taux de transmission du vitrage, date, heure et jour). Certaines de ces valeurs n'étant pas disponibles ou difficilement accessibles, nous avons fait appel à une méthode d'estimation et d'approximation pour les définir. Cette étape de mesure et de quantification consiste à analyser les images représentatives des types d'effets de lumière présents dans les projets de références choisies pour identifier les valeurs nécessaires à la réalisation des simulations. L'objectif est de reproduire les mêmes conditions d'éclairage entre l'image du projet réel et les simulations.



N°	Indicateur	Valeur
1	Localisation	Chaumont-France
2	Facteur de réflexion du sol extérieur	> 0,8
3	Type de ciel	Ensoleillé
4	Masque solaire	*
5	Coefficient de transmission lumineuse du vitrage	> 0,8
6	Indice de compacité	~1,9
7	Disposition des ouvertures	Verticale
8	Proportion des ouvertures	01-mars
9	Position des ouvertures	Longitudinale
10	Indice d'ouverture	~1,6
11	Indice de profondeur	~1,6
12	Orientation des ouvertures	Sud
13	Proportion des espaces	~8
14	Dispositif de protection	Brise soleil horizontal
15	Echelle de l'espace	Humaine
16	Epaisseur de la façade	*
17	Indice de vitrage	~1
18	Nombre d'ouverture	1
19	Forme de l'espace	Rectangulaire
20	Type d'utilisation	Circulation/transition
21	Indice de contraste	~1/10
22	Indice de chromaticité des surfaces	clair
23	Facteur de réflexion des parois	0,5
24	Facteur de réflexion du sol+Surfaces de travail	0,5
25	Facteur de réflexion du plafond	0,5
26	Niveau d'éclairement moyen	~3000 Lux
27	Facteur de lumière du jour moyen	%12,5
28	Luminance moyenne	800 cd/m2

* Indéfini

N°	Indicateur	Valeur
1	Localisation	Cadiz-Espagne
2	Facteur de réflexion du sol extérieur	> 0,8
3	Type de ciel	Ensoleillé
4	Masque solaire	*
5	Coefficient de transmission lumineuse du vitrage	> 0,8
6	Indice de compacité	~1,5
7	Disposition des ouvertures	Horizontale
8	Proportion des ouvertures	~1/3
9	Position des ouvertures	Bas
10	Indice d'ouverture	~0,5
11	Indice de profondeur	~0,6
12	Orientation des ouvertures	Est/Ouest
13	Proportion des espaces	~1/1
14	Dispositif de protection	Débord de toit
15	Echelle de l'espace	Monumentale
16	Epaisseur de la façade	*
17	Indice de vitrage	~1
18	Nombre d'ouverture	2
19	Forme de l'espace	Carré
20	Type d'utilisation	Séjour
21	Indice de contraste	~1/8
22	Indice de chromaticité des surfaces	clair
23	Facteur de réflexion des parois	0,85
24	Facteur de réflexion du sol+Surfaces de travail	0,9
25	Facteur de réflexion du plafond	0,85
26	Niveau d'éclairement moyen	~680Lux
27	Facteur de lumière du jour moyen	~7,5%
28	Luminance moyenne	~200 cd/m2

* Indéfini

Fig 100. Caractérisation des effets de lumière naturelle dans des projets de référence (Inspection Académique

Chaumont, Haute-Marne- Pierre Bolze et Simon Rodriguez/Maison Guerrero-Alberto Campo Baeza)

Nous définissons pour chaque projet de référence choisi un tableau de caractérisation avec la liste des indicateurs et leurs valeurs respectives. Malgré le travail de recherche et d'estimation, certaines valeurs d'indicateurs comme la date et l'heure, les facteurs de réflexion des parois restent assez flous et imprécis, mais permettent d'établir une connaissance globale couvrant des domaines physiques et géométriques des ambiances de lumière naturelle en milieu architectural. L'analyse, la comparaison et le croisement des résultats de la caractérisation des exemples de références nous ont donné l'occasion de dégager les propriétés communes capables de décrire chacun des types d'effets de lumière naturelle identifiés. À partir de ces résultats, nous avons pu définir des plages de valeurs pour les différents indicateurs qui déterminent les conditions nécessaires à la génération d'un type d'effet de lumière particulier (type de ciel, taux d'ouverture, orientation). Nous également défini des plages de valeurs pour les indicateurs qui quantifient et qualifient le type d'effet de lumière lui-même (moyenne des

éclairagements, indice de contraste). Ainsi, pour les effets de type lumière « *rasante* », « *englobante* » nous avons défini que le ciel est de type ensoleillé avec des surfaces d'ouvertures orientées sud ou est générant des moyennes d'éclairement variant respectivement entre 400 et 4000 lux. Ces effets présentent une différence majeure au niveau des indices de contraste qui sont de l'ordre de 1/30 pour la lumière « *rasante* » et de 1/10 « pour la lumière « *englobante* ». Les espaces générant des effets de lumière de type « *englobante* » et « *uniforme* » possèdent un taux d'ouverture assez fort supérieur à 2/3 de la surface et un indice de contraste de l'ordre de 1/10 avec une différence au niveau des moyennes des éclairagements variant respectivement entre 4000 et 400 lux (Cf. Tab 8).

Lumière Englobante			Lumière Uniforme		
N°	Indicateur	Valeur	N°	Indicateur	Valeur
1	Localisation	*	1	Localisation	*
2	Facteur de réflexion du sol extérieur	> 0.8	2	Facteur de réflexion du sol extérieur	> 0.8
3	Type de ciel	*	3	Type de ciel	*
4	Masque solaire	*	4	Masque solaire	*
5	Coefficient de transmission lumineuse du vitrage	> 0.8	5	Coefficient de transmission lumineuse du vitrage	> 0.8
6	Indice de compacité	*	6	Indice de compacité	*
7	Disposition des ouvertures	*	7	Disposition des ouvertures	*
8	Proportion des ouvertures	*	8	Proportion des ouvertures	*
9	Position des ouvertures	*	9	Position des ouvertures	*
10	Indice d'ouverture	> 0.8	10	Indice d'ouverture	> 0.8
11	Indice de profondeur	> 0.8	11	Indice de profondeur	> 0.8
12	Orientations des ouvertures	*	12	Orientations des ouvertures	*
13	Proportion des espaces	*	13	Proportion des espaces	*
14	Dispositif de protection	*	14	Dispositif de protection	*
15	Echelle de l'espace	*	15	Echelle de l'espace	*
16	Epaisseur de la façade	*	16	Epaisseur de la façade	*
17	Indice de vitrage	> 0.9	17	Indice de vitrage	*
18	Nombre d'ouverture	*	18	Nombre d'ouverture	*
19	Forme de l'espace	*	19	Forme de l'espace	*
20	Type d'utilisation	Circulation/transition	20	Type d'utilisation	Circulation/transition/exposition/culte/séjour
21	Indice de contraste	~1/10	21	Indice de contraste	~1/10
22	Indice de chromaticité des surfaces	clair	22	Indice de chromaticité des surfaces	clair
23	Facteur de réflexion des parois	< 0.6	23	Facteur de réflexion des parois	> 0.6
24	Facteur de réflexion du sol+Surfaces de travail	< 0.6	24	Facteur de réflexion du sol+Surfaces de travail	> 0.6
25	Facteur de réflexion du plafond	< 0.6	25	Facteur de réflexion du plafond	> 0.6
26	Niveau d'éclairement moyen	~4000 Lux	26	Niveau d'éclairement moyen	~400 Lux
27	Facteur de lumière du jour moyen	> 8%	27	Facteur de lumière du jour moyen	6% - 8%
28	Luminance moyenne	600 cd/m2	28	Luminance moyenne	100 cd/m2
* Indéfini			* Indéfini		

Tab 8. Caractérisation des types d'effets de lumière naturelle

La définition de ces plages de valeurs valide certains aspects de la caractérisation sémantique des effets de lumières identifiés. Malgré leur faible niveau de détail et de précision, ces valeurs constituent une référence tangible capable d'être intégrée à une méthode générative qui les traduit en solutions architecturales générant les types d'effets de lumière naturelle décrits.

3.3 Détermination des fonctions de caractérisation des types d'effet de lumière

Comme nous l'avons évoqué dans la première partie de ce chapitre, notre méthode propose une caractérisation des types d'effets de lumière naturelle sous la forme de fonctions. Ces fonctions mettent en relation des indicateurs de performance portant sur la dimension quantitative de la lumière naturelle et des indicateurs de répartitions des apports solaires. Chaque fonction possède un objectif que l'algorithme génératif essaye d'atteindre afin de proposer des solutions architecturales générant un type d'effet particulier.

La mise en place des fonctions de caractérisation s'est faite en trois étapes : une première étape pour déterminer les indicateurs de performance capables de décrire d'une manière globale le comportement lumineux d'un type d'effet particulier, une deuxième de mise en relation de ces indicateurs sous la forme de fonctions de caractérisation et enfin une troisième étape d'évaluation et d'optimisation des fonctions.

3.3.a Détermination des indicateurs de performance

Cette étape vise à déterminer les indicateurs de performance capables de décrire d'une manière globale le comportement lumineux d'un type d'effet particulier. La dimension globale d'un indicateur est définie comme étant sa capacité à prendre en compte la variation de la lumière naturelle dans le temps et selon les conditions d'éclairage. Nous avons fait le choix de prendre en compte la quantité annuelle des apports solaires comme indicateur de référence pour la mise en place de nos fonctions de caractérisation. Cet indicateur permet de mesurer la quantité des apports solaires sur un point particulier de l'espace architectural durant une année, en prenant en compte la variation des conditions d'éclairage (type de ciel). La valeur des apports solaires est calculée selon la méthode *Cumulative sky* (Robinson, Stone, 2004) intégrée au logiciel de simulation *Radiance*[®]. Cette méthode de calcul permet de couvrir une large période de simulation sans faire appel à des simulations horaires demandant un temps de calcul assez lourd et non adapté à une activité d'assistance à la conception (comme c'est le cas du calcul des éclairagements). La méthode de calcul *Cumulative sky* fait appel au fichier climatique du site d'implantation du projet pour déterminer la répartition des types de ciels sur une durée totale d'une année et ainsi prendre en compte la variation des conditions d'éclairage dans le calcul des apports solaires. L'utilisation de cet indicateur dans notre outil permet de créer des configurations architecturales générant un type d'effet de lumière naturelle particulier sans préciser la date, l'heure et le type de ciel. Cette propriété permet d'avoir des solutions avec un potentiel plus large pouvant générer des formes différentes d'un type d'effet particulier et sous différentes conditions.

La valeur des apports solaires annuels est calculée sur une grille de points dont la position est connue. Ainsi, nous pouvons déterminer la quantité des apports solaires dans une zone particulière de l'espace intérieur.

3.3.b Mise en relation des indicateurs de performance

La deuxième étape consiste à mettre en relation les indicateurs identifiés pour décrire un type d'effet de lumière particulier. Pour mettre en évidence cette corrélation, nous avons évalué les apports solaires de configurations générant un type d'effet particulier. Ces configurations ont été réalisées en utilisant le modèle paramétrique du prototype d'outil *DaylightGen* (Cf. *Partie B.Chapitre II.2.2.b*). Les propriétés de ces configurations sont issues de l'analyse des exemples de référence étudiés au début de la phase de caractérisation. Ces propriétés portent sur les ouvertures (la taille, la disposition, l'orientation) et sur les matériaux utilisés pour les différentes surfaces. Le comportement lumineux de

ces configurations a été évalué pour vérifier qu'elles génèrent un type d'effet bien particulier. Nous avons considéré ces configurations comme des références capables de générer des types d'effet de lumière naturelle précis. Ensuite, nous avons évalué la quantité et le mode de répartition des apports solaires créés par ces configurations. Ces évaluations²¹ ont été réalisées dans le contexte géographique et climatique de la ville de Nancy. Les résultats de ces évaluations ont été comparés permettant de donner une estimation précise et contextualisée de valeurs d'indicateurs décrivant des types d'effet de lumière particuliers.

Exemples de configurations générant un effet de type "Lumière rasante"



Résultats des évaluations

Configuration	Moyenne	Ecart type
1	121	99,69
2	154,38	100,55
3	160,96	105,99
4	155,74	103,66
5	140,93	100,06
6	130,32	100,75
7	140,2	105,49
8	140,51	102,12
9	135,8	98,49
Moyenne	142,2044444	101,8666667

Fig 101. Evaluation des configurations générant un effet de type "Lumière rasante"

L'analyse des résultats de ces simulations a mis en évidence un ensemble de corrélation qui peut participer à la caractérisation des types d'effet de lumière. Ainsi, nous avons révélé l'existence d'une corrélation entre les valeurs des moyennes et des écarts types des valeurs des apports solaires pour des types d'effets comme « *lumière uniforme* », « *lumière englobante* » et « *lumière rasante* ». Cette analyse de résultats a permis de définir un indicateur de caractérisation pour les effets de lumière de type « *contrasté-tâches solaires* » et « *contrasté-clairière* » identifiant le nombre de points de calcul ayant une valeur supérieur à 80 % de la valeur maximale des apports solaires. Enfin, le traitement des résultats de simulation montre l'existence d'un ratio entre la valeur de la moyenne des apports solaires

²¹ Ces évaluations ont été réalisées en utilisant une grille de points de calcul positionnées parallèlement à la surface d'ouverture (sauf pour les configurations générant le type d'effet « Lumière contrastée-Fond de pièce » où la grille de points de calcul a été positionnée au niveau du sol) composée de 36 points de calcul. Le choix de ce type de grille de calcul et de nombre de points de calcul permet de simplifier l'étape d'analyse des résultats issus des simulations.

des points de calcul situés à proximité des ouvertures (rassemblent les points occupant le premier tiers de la surface du sol) et ceux situés au milieu et au fond des configurations étudiées (intégrant le reste des points et occupant 2/3 de la surface du sol). Ces différentes constatations forment une base pour la mise en place d'une caractérisation précise des types d'effet de lumière utilisable par un algorithme génératif.

3.3.c Formulation des fonctions de caractérisation

La troisième étape de mise en place des fonctions de caractérisation consiste à structurer les indicateurs et les mettre sous la forme de fonctions d'optimisation adaptées à un algorithme génératif. Chaque type d'effet identifié est caractérisé par une fonction d'optimisation. Nous avons fait le choix de définir un seul objectif pour ces fonctions qui consiste à minimiser leurs valeurs. Ce choix permet de simplifier et d'uniformiser l'activité de paramétrage de l'algorithme génératif intégré au prototype d'assistance *DaylightGen*. Les simulations réalisées permettent de caractériser le type d'effet « *lumière rasante* » par des valeurs d'apport solaires sur les points de calcul créant un écart type de l'ordre de 100 et une moyenne estimée à 140 kWh/m². Ainsi, la valeur de l'écart type est égale à trois fois la valeur de la moyenne des apports. Ces résultats sont mis sous la forme d'une fonction qui décrit ce comportement et dont le résultat doit être égal à zéro :

- X = Ecart type des valeurs des apports sur les différents points de calcul {objectif=100}
- Y = Moyenne des apports {objectif=140}
- f = Valeur de la fonction {objectif=0}

L'ensemble de ces paramètres mis en relation permet de définir la fonction de caractérisation suivante :

$$f = (X - 100) + (Y - 140)$$

Cette fonction a été intégrée à l'outil *DaylightGen* afin de déterminer sa capacité de génération de solutions créant le type d'effet « *lumière uniforme* » durant un temps de calcul moyen de 30 min (adapté à une activité de conception). Cette capacité à vérifier la description des types d'effet est évaluée à travers le niveau de conformité. Ce dernier est estimé en calculant le nombre de solutions vérifiant l'effet décrit sur un total des 100 premières. À partir de résultats de cette évaluation, nous avons essayé d'optimiser les fonctions pour atteindre un niveau de conformité de 80%. Pour aider l'algorithme génératif à atteindre ces objectifs, nous avons intégré la corrélation entre la valeur de la moyenne et la valeur de l'écart type donnant la fonction suivante :

$$f = (X - 100) + (Y - (1.4 * X))$$

La mise en place de cette corrélation améliore les performances de l'algorithme génératif, mais qui reste instable avec des valeurs de niveau de conformité variant entre 40 à 60% avec un temps de calcul

plus long. Afin de stabiliser la performance de l'algorithme nous avons réduit le champ de variation des indicateurs en mettant une contrainte de type valeur absolue sur mes deux objectifs donnant la fonction suivante :

$$f = Abs(X - 100) + Abs(Y - (1.4 * X))$$

Cette première étape de normalisation permet d'accélérer le processus de recherche des solutions les plus performantes créant un niveau de conformité de l'ordre de 60 à 70%. La seule limite de cette fonction est qu'elle permet de vérifier les objectifs des deux indicateurs en même temps avec un écart assez considérable dans certains cas. L'origine de cette différence est expliquée par le manque de normalisation de la fonction. La normalisation consiste à définir un domaine de variation des valeurs de chacun des indicateurs entre 0 et 1. Ce domaine est défini en identifiant la valeur minimale et la valeur maximale pour chaque indicateur. La définition de ces domaines de variation est une activité complexe qui n'a pas donné de résultats concluants. Afin de résoudre ce problème de normalisation des fonctions d'optimisation, nous avons attribué des indices de pondération (P) à chaque indicateur. Ces derniers permettent d'équilibrer les poids et de varier l'influence des indicateurs dans la résolution des fonctions.

Nous avons suivi un processus itératif afin de déterminer la valeur de poids attribué à chaque indicateur de la fonction. Dans le cas du type d'effet « *lumière rasante* », ce processus a donné lieu à une valeur de pondération égale à 1 pour l'écart type et de 10 pour la moyenne des apports permettant ainsi d'équilibrer la fonction d'optimisation. Cette fonction vérifie un niveau de conformité de l'ordre de 80 % avec un temps de calcul de 30 minutes (15 générations composées de 50 individus) :

$$f = (Abs(X - 100)) + (10 * (Abs(Y - (1.4 * X))))$$

Le processus de définition et d'optimisation des fonctions de caractérisation des types d'effet de lumière naturelle est un processus complexe au croisement de divers champs disciplinaires en rapport la connaissance quantitative et qualitative de la lumière naturelle et les fonctions mathématiques d'optimisation. Les résultats de ce processus ne sont pas exhaustifs, mais constituent une première réponse à une question de caractérisation objective d'un phénomène qualitatif. Nous avons suivi le même processus pour la définition des fonctions de caractérisation des autres types d'effet de lumière (Cf. Annexe 3). Ces fonctions permettent de décrire les types d'effet de lumière seulement dans le contexte géographique et climatique de la ville de Nancy et dans le contexte spatial défini par le modèle paramétrique utilisé.

4. Génération des solutions

Cette étape consiste à prendre en compte la description physique des intentions déclarées par le concepteur en termes de types d'effets de lumière pour les interpréter et proposer des solutions architecturales. Ces solutions architecturales présentent des configurations spatiales et des conditions d'éclairage capables de créer les effets de lumière naturelle imaginés et décrits par le concepteur. Trois modules principaux participent à cette activité : un moteur morphologique, un moteur génératif et un moteur d'évaluation (Cf. Fig 102). Le moteur morphologique est un générateur de configurations architecturales. Il intègre des paramètres qui influencent le mode de captation et de distribution de la lumière naturelle. La variation de ces paramètres génère des configurations architecturales qui produisent une différence au niveau de la quantité et les modes de distribution des apports solaires.

Les paramètres gérés par le moteur morphologique sont de deux types. Ceux du premier type permettent de décrire l'espace architectural en déterminant sa forme, son orientation, ses proportions et son échelle. Alors que ceux du deuxième type caractérisent les dispositifs d'éclairage en déterminant la face d'ouverture, leurs dimensions, leurs proportions, leurs dispositions, leur nombre et leurs propriétés de transmission. Chaque paramètre possède un domaine de variation qui définit ses valeurs potentielles. Ces valeurs ont été identifiées à partir des travaux de caractérisation du rapport entre la lumière naturelle et l'architecture (Cf. Partie A.Chapitre II.1.6).

La variation de ces paramètres est assurée par le deuxième module à savoir, le moteur génératif. Ce dernier modifie la valeur attribuée à chacun des paramètres pour atteindre un objectif bien déterminé. Pour notre méthode, cet objectif correspond au type d'effet de lumière que le concepteur a l'intention de créer dans son projet. Cet objectif est traduit sous la forme d'une fonction de caractérisation qui met en relation les propriétés physiques qui caractérisent chacun des effets de lumières que nous avons identifiés plus haut. Chaque fonction possède une valeur « *objectif* » décrivant le comportement physique de l'effet de lumière concerné. Le moteur génératif fait appel au moteur d'évaluation du comportement lumineux (troisième module) pour définir la valeur de la fonction « *objectif* » de chaque configuration générée. Cette évaluation mesure l'influence de la variation des paramètres sur le comportement lumineux de chaque configuration proposée. La correspondance entre l'effet produit par les solutions générées et les intentions du concepteur est déterminée par la comparaison entre la valeur calculée de la fonction de caractérisation pour chaque solution et la valeur « *objectif* » décrivant le comportement d'un type d'effet de lumière.

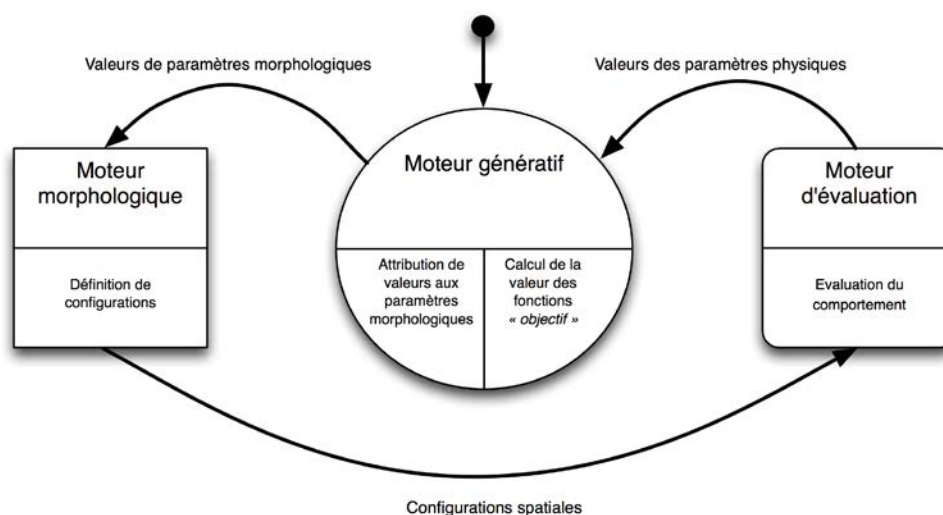


Fig 102. Processus de génération de solutions

La répétition du processus itératif associant le moteur morphologique, le moteur génératif et le moteur d'évaluation pour réaliser des activités de génération, d'évaluation et d'optimisation de configuration spatiales, nous offre la possibilité de proposer une méthode de génération de solutions architecturales. Ces solutions créent différents niveaux de correspondance par rapport aux intentions d'effets de lumière naturelle exprimées par le concepteur.

5. Prise de connaissance

La méthode d'assistance propose une collection de solutions comme réponse à la description des intentions du concepteur. Cette description, globale et non détaillée, donne lieu à des solutions diverses présentant plusieurs niveaux de correspondances par rapport aux intentions. La diversité des solutions est une chance pour le concepteur, en lui offrant des pistes et des champs de conception auxquels il n'aurait pas pensé. La mise en évidence et l'exploitation des potentialités créatives offertes par les solutions générées font appel aux activités de découverte et d'exploration intégrées à la méthode d'assistance. Ces activités s'organisent autour de cinq opérations : filtrer, naviguer, évaluer, statuer et sélectionner (Cf. Fig 103).

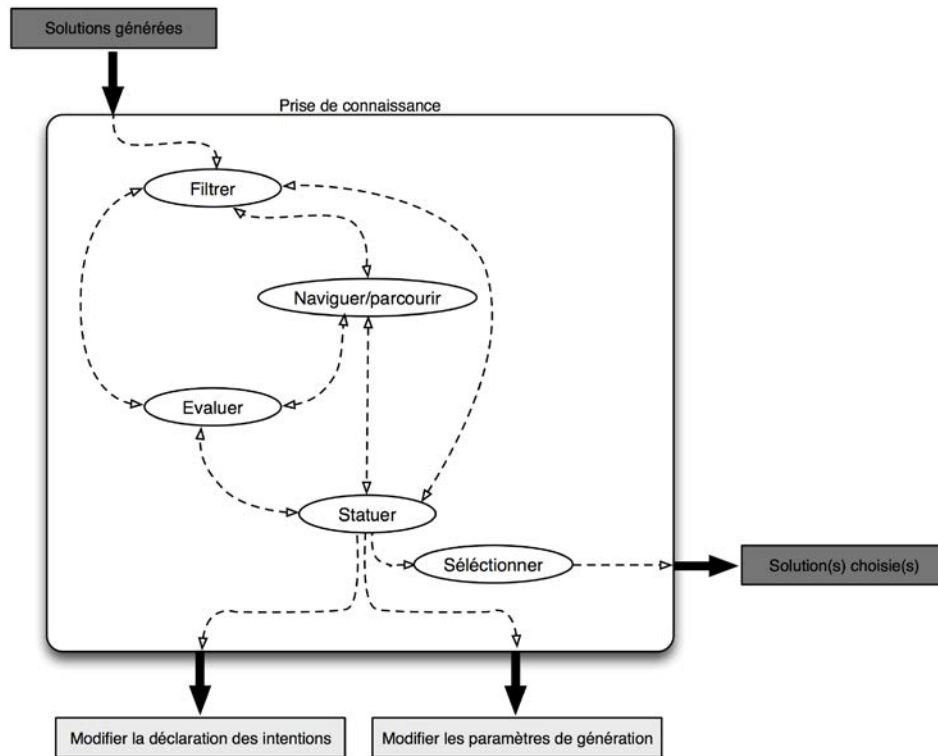


Fig 103. Activités de la phase de prise de connaissance

L'objectif de la méthode est d'élargir le champ de recherche et de découverte du concepteur tout en assurant un degré de maîtrise de l'objet d'étude à savoir les effets de lumière naturelle. Ainsi, nous ne proposons pas la meilleure solution vérifiant la description d'un type d'effet, mais plutôt un ensemble de solutions potentielles. L'application de filtres s'appuyant sur deux types de critères, nous permettant de sélectionner un nombre déterminé de solutions à présenter au concepteur. Le premier type de critères, est en rapport avec les intentions mêmes du concepteur, sélectionne les solutions qui vérifient la fonction de caractérisation du type d'effets de lumière naturelle choisi. Le deuxième type de critères, optionnel et constituant un niveau de filtrage supplémentaire, permet au concepteur de sélectionner les solutions selon des propriétés spécifiques comme l'orientation ou le nombre d'ouvertures.

La découverte du potentiel créatif des solutions générées nécessite des moyens de navigation et de parcours. La méthode de navigation proposée offre une vision et une lecture globales des propriétés des solutions générées. Cette vue sur l'ensemble des solutions permet au concepteur de repérer rapidement celles qui peuvent l'intéresser. Il pourra ensuite parcourir une par une les solutions repérées pour obtenir des informations détaillées et précises le guidant dans ses choix. Cette méthode de parcours crée un deuxième niveau de lecture ponctuel et précis du potentiel des solutions. Des annotations visuelles participent au processus de lecture en indiquant au concepteur les informations importantes à statuer sur la validité des solutions et leur capacité à répondre à ses attentes. Elles

peuvent être sous la forme d'indicateurs de performance et de caractérisation. Les premières informent le concepteur sur le niveau de correspondance entre le comportement des solutions générées et les objectifs définis par les intentions. Alors que les deuxièmes indiquent les propriétés internes et non visibles de chaque solution parcourue (type de parois, type de vitrage, surface des ouvertures).

La détermination et la visualisation des propriétés quantitative et qualitative du comportement lumineux des solutions générées nécessitent l'intervention de module d'évaluation. D'un côté elles permettent au concepteur de vérifier, visuellement, si l'effet de lumière naturelle produit par la solution générée correspond à ses intentions. D'un autre côté, elle lui donne la possibilité de quantifier l'apport lumineux que produit chacune des solutions. Le résultat de cette double évaluation du comportement lumineux constitue une référence précise qui participe à l'activité de sélection et de choix des solutions potentiellement intéressantes pour le concepteur.

À partir des résultats des activités de navigation, de parcours et d'évaluation, le concepteur s'est constitué un ensemble de critères de sélection qui vont lui permettre de statuer sur les solutions générées. Suit alors une activité de sélection où le concepteur compare les propriétés et le comportement des solutions proposées pour sélectionner celles qui peuvent avoir un potentiel créatif pour son projet et présenter une réponse aux intentions et aux contraintes posées. L'objectif est de constituer un sous ensemble de solutions considérées comme des références contextualisées et représentant une matérialisation des intentions du concepteur à utiliser comme point de départ pour la conception de son projet.

L'étape de prise de connaissance se conclut selon deux schémas. Un premier schéma, le concepteur a trouvé des solutions intéressantes qui correspondent à ses attentes et qui vérifient ses intentions et les contraintes auxquelles il est confronté tout en présentant un potentiel créatif. Ces solutions peuvent ainsi participer au processus de développement de son projet et constituer des pistes de conception. Dans ce cas il peut choisir une ou plusieurs solutions afin d'aborder la phase d'appropriation et de personnalisation de ces choix.

Dans un deuxième schéma, le concepteur ne trouve pas de solutions satisfaisantes à ses attentes. Dans ce cas trois choix se présentent à lui : le premier consiste à modifier les critères de filtrage de solutions afin de visualiser un nouveau sous-ensemble pouvant avoir un potentiel intéressant ; le deuxième consiste à revenir à une phase de génération des solutions en modifiant les paramètres qui gèrent le processus génératif. Ces derniers influencent le mode de génération et apportent une nouvelle collection de solutions ; enfin, le troisième choix est de relancer l'ensemble du processus pour revenir à la phase de déclaration des intentions. Dans ce cas le concepteur peut modifier sa sélection de types d'effet de lumière et relancer l'ensemble du processus génératif.

6. Appropriation des solutions

La place de la phase d'appropriation des solutions sélectionnées a pour but de créer une continuité entre le concepteur et la méthode d'assistance à la conception. Cette continuité se matérialise par un processus itératif exploitant les solutions choisies et proposant des activités de modification, d'évaluation et de comparaison et de sélection (Cf. Fig 104). Dans cette phase, le concepteur dispose d'outil de transformations capables de modifier les propriétés caractéristiques des solutions choisies. L'objectif est d'adapter les solutions au contexte réel du projet de conception ou de permettre au concepteur de définir une configuration architecturale qu'il a imaginée durant sa confrontation aux résultats de génération et de l'évaluation. Une activité d'évaluation est présente dans cette phase, elle permet de déterminer le comportement lumineux des nouvelles configurations (dimensions quantitative et qualitative) en prenant en compte le contexte du projet de conception. À partir de ces résultats, le concepteur peut statuer sur la validité des modifications qu'il a appliquées aux solutions choisies. Il peut ainsi comparer les résultats de l'évaluation des solutions choisies et celles des solutions modifiées afin de mesurer l'influence de son intervention sur le comportement lumineux. Les solutions, ainsi obtenues, peuvent être ensuite affinées et évoluées d'une manière progressive suivant un processus itératif reposant sur les activités de modification, d'évaluation, de comparaison et de prononciation. Ces activités constituent la capacité d'accompagnement qu'apporte notre méthode d'assistance au processus de conception architectural.

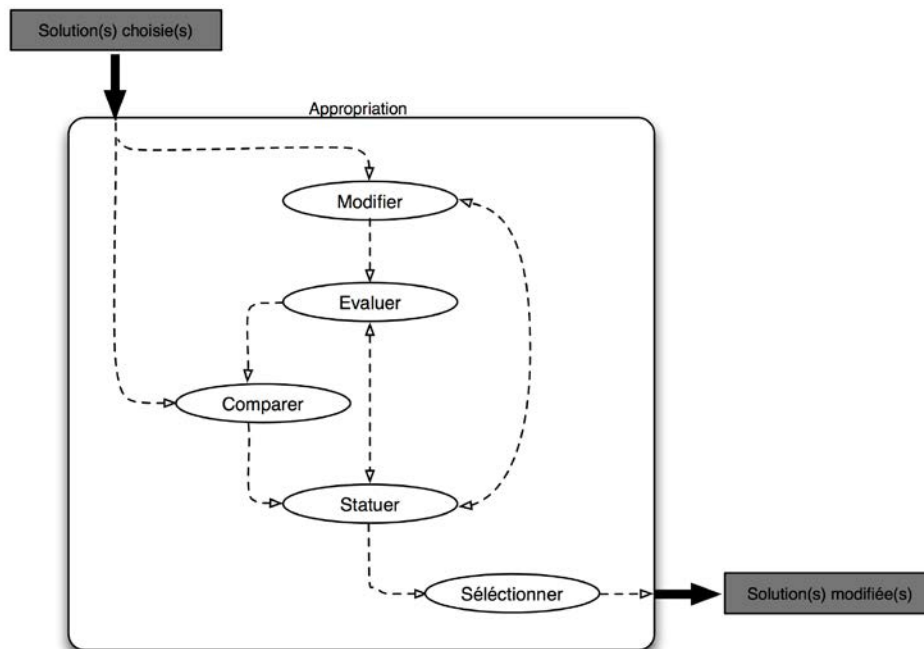


Fig 104. Activités de la phase d'appropriation

7. Synthèse

Nous avons essayé de montrer dans ce premier chapitre les objectifs de la méthode d'assistance que nous proposons à savoir proposer une aide à l'intégration des effets de lumière naturelle dès les premières phases de conception et d'accompagner le concepteur dans sa démarche créative durant les étapes suivantes du projet. Nous avons ensuite présenté le schéma global de cette méthode d'assistance avec l'ensemble des phases qui la caractérise. Ces phases ont été développées une par une afin de définir les principaux acteurs et composants ainsi que les activités et leur enchaînement qui constituent le processus d'assistance à la conception. Nous avons ainsi précisé le mode de participation et l'apport de chacune des phases dans la démarche d'assistance à la conception.

L'évaluation du potentiel d'assistance que peut apporter la méthode et son niveau d'adaptation à un contexte de conception réel nécessite son implémentation dans un outil. Ce dernier intégrera des opérateurs, modules et mécanismes logiciels capables de retranscrire l'ensemble des phases, des tâches et des activités qui caractérisent le processus de la méthode d'assistance que nous avons défini.

Chapitre II. Implémentation d'un outil d'aide à la conception

1. Environnement d'implémentation

L'implémentation d'une méthode d'assistance comme celle que nous venons de définir est régie par un ensemble de facteurs qui conditionne le succès d'un tel développement. Ces facteurs sont en rapport avec la nature de la méthode, le profil des utilisateurs et le profil du développeur.

1.1 La nature de la méthode

Notre méthode est structurée sous la forme d'une méthode de modélisation déclarative qui démarre à partir d'une description et une adaptation des paramètres pour atteindre un objectif bien défini. Ce type de processus déclaratif, génératif et itératif fait appel à des modules permettant de réaliser ces opérations et de les enchaîner. Le processus déclaratif tel qu'il est dans la méthode proposée fait appel à la notion d'images de références permettant au concepteur de décrire ses intentions d'une manière intuitive et de permettre à la méthode de les identifier. Un module logiciel de gestion et de navigation dans une base de données d'images référencées permet de répondre à cet objectif. Il crée une interaction entre le système et le concepteur en lui donnant la possibilité de sélectionner des images selon leur capacité à représenter ses intentions.

Nous avons également besoin de modules logiciel intégrant un modèle numérique de modélisation géométrique paramétrique et un modèle numérique d'optimisation et de génération. Ces deux derniers modules servent à créer des configurations architecturales et à les optimiser en faisant varier leurs propriétés pour atteindre un objectif qui est, dans notre cas, une description qualitative d'effet de lumière naturelle identifiée à partir de la sélection d'images. Ce type de description non géométrique nécessite l'intervention d'un module évaluateur capable de comparer le comportement lumineux des solutions générées avec la description des effets de lumière naturelle. Ce besoin doit être matérialisé par un modèle numérique de simulation physique capable de quantifier les apports lumineux et leurs distributions dans l'espace architectural. L'environnement logiciel choisi doit garantir, d'une part, une liaison et entre le module paramétrique, le module génératif et le module d'évaluation pour assurer l'activité de génération et d'autre part une liaison entre ces trois modules et le système interactif de gestion des références pour identifier les intentions du concepteur.

La phase de prise de connaissance réalisée grâce aux activités de visualisation, de navigation et de sélection nécessite la mise en place d'un module logiciel de représentations géométriques tridimensionnelles. Ce modèle doit intégrer des fonctions de visualisation globale et unitaire, de parcours des solutions générées et d'annotations afin de guider le concepteur dans ses choix. Les activités de modification qui caractérise la phase d'appropriation exigent la mise en place d'opérateurs de transformation géométriques permettant au concepteur de reconfigurer les solutions issues de la génération.

La déclaration des intentions, la génération des solutions et leur visualisation intègrent un transfert de données et d'information d'où le besoin de module logiciel de gestion de base de données. Ce dernier doit permettre de stocker l'information issue de la phase de déclaration des intentions et celles issues de la génération de solutions et d'assurer leur transfert entre des modules de nature différente (module interactif de gestion de références, module de génération et module de représentation).

1.2 Le profil des utilisateurs

La méthode d'assistance que nous proposons est destinée à un public constitué principalement d'architectes. L'étude des méthodes et outils d'assistance à la conception (Cf. Partie A.Chapitre IV) a montré que le besoin de ce type d'utilisateur consiste à manipuler des données qualitatives moyennant des supports graphiques particulièrement durant les phases conceptuelles du processus de conception architecturale. Ainsi, les différents modèles numériques choisis doivent fournir des supports graphiques pour l'ensemble des opérations à savoir la déclaration des intentions, la génération des solutions, l'évaluation et l'appropriation des résultats des solutions générées. L'objectif est de garantir une adaptation entre le support d'assistance et le type de données manipulées pour la maîtrise des ambiances lumineuses durant les phases précoces du projet.

La nouvelle génération d'architectes a réussi à acquérir une connaissance des outils de conception assistée par ordinateur dans le cadre de leur formation et de leur profession. Le choix d'un environnement logiciel pour l'implémentation de cette méthode doit prendre en compte ce constat en proposant un dispositif de développement intégrant une logique de fonctionnement semblable à celle des outils d'assistance à la conception utilisés dans la conception architecturale.

1.3 Le profil du développeur

Le choix de l'environnement du logiciel doit tenir compte du profil du développeur à savoir celui d'un architecte travaillant dans le domaine des méthodes et outils d'assistance à la conception architecturale et particulièrement celles portant sur la maîtrise du comportement lumineux. Ce profil implique des connaissances en terme d'utilisation et de manipulation des modèles numériques de modélisation géométrique paramétrique et impérative, des modèles de simulation de la lumière naturelle et des

modèles génératifs. En revanche, ce profil n'implique pas une maîtrise des techniques de programmation issues d'une formation complète en conception en développement de logiciels.

L'objectif est de manipuler un environnement de développement logiciel proposant une assistance et une simplification de l'activité de programmation.

1.4 Choix de l'environnement de développement

Suite aux différents facteurs que nous venons d'évoquer et en prenant en compte l'analyse des méthodes et des outils d'assistance à la conception (Cf. Partie A.Chapitre III), nous avons choisi le logiciel d'indexation d'images *Image* développé par Pascal Humbert²² et le prototype d'outil d'aide à la définition et la formulation des intentions à partir d'images références *Day@mbiance* (Salma Chaabouni, 2011) comme module logiciel permettant d'implémenter la phase de déclaration des intentions et d'identification des intentions du concepteur. Le premier module logiciel, *Image*, permet d'attribuer une caractérisation sémantique à des images de projet de référence représentant des types d'effets de lumière naturelle. Alors que le deuxième, *Day@mbiance*, propose une navigation interactive avec des fonctions de sélection permettant au concepteur de déclarer ses intentions d'ambiances de lumière naturelle.

Le modelleur 3D *Rhinoceros*[®] et son éditeur d'algorithme graphique *Grasshopper*[®] ont été choisis comme environnement de développement pour implémenter la phase de génération, d'évaluation et de prise de connaissance et d'appropriation de la méthode d'assistance. L'outil de modélisation géométrique impérative *Rhinoceros*[®] à travers son plug-in *Grasshopper*[®] permet de créer des algorithmes d'une manière graphique sans avoir besoin de connaissances avancées en terme de programmation informatique. Il est utilisé pour programmer et contrôler des modèles paramétriques de configurations architecturales en les reliant à des algorithmes génératifs. *Grasshopper*[®] propose également l'intégration de passerelles entre des modèles paramétriques et des moteurs de simulation de la lumière naturelle comme *Radiance*[®]. Cet environnement contient des composants qui facilitent la définition et le contrôle des paramètres de simulation ainsi que la récupération des résultats des évaluations. Enfin, des composants d'échanges de données créent des passerelles entre les modèles paramétriques, les moteurs de simulation et des bases de données. Ils participent aux interfaces d'échanges entre le système de déclaration d'intention et le système de génération de solution et de la même manière entre ce dernier et le système de visualisation des solutions.

²² Ingénieur de recherche au Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (MAP/CRAI), Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.

2. Processus d'implémentation de l'outil (DaylightGen)

L'outil proposé est structuré selon le schéma de fonctionnement de la méthode d'aide à la conception que nous avons proposé. Il s'agit d'une retranscription des phases de la méthode en un enchaînement d'activités et d'actions réalisées par l'ensemble des acteurs intervenant dans le processus d'assistance. Trois acteurs participent à ce processus, le concepteur comme utilisateur de l'outil en charge des activités de description des intentions, de choix et d'appropriation des solutions, le système responsable des activités de génération et d'évaluation de solutions et enfin une interface gérant les activités de visualisation et d'échanges entre l'utilisateur et le système (Cf. Annexe 2). Nous essayons dans la partie suivante de détailler les activités qui caractérisent les trois phases structurant la méthode en mettant en évidence les tâches qui les composent et leur enchaînement. Nous définissons aussi les supports logiciels et le mode d'implémentation utilisés pour chacune des activités.

2.1 Implémentation de la phase de description des intentions

Cette activité est structurée selon la méthode proposée par Salma Chaabouni (Salma Chaabouni, 2011) dans son travail de thèse et utilisant des images de références représentant des types d'effets de lumière naturelle pour permettre au concepteur de déclarer et formaliser ses intentions. Cette méthode a été implémentée dans un outil interactif de navigation (*Day@mbiance*) permettant de parcourir une base d'images références. Les images constituant la base de donnée sont indexées par des mots clés décrivant de manière sémantique les propriétés des configurations architecturales représentées et les types d'effets de lumière naturelle qu'elles génèrent. Chacun des mots clés est caractérisé par un poids qui varie entre 0 et 1. Cet outil propose une mosaïque d'images permettant au concepteur de sélectionner des images, de les refuser ou de garder une neutralité selon leur niveau de correspondance à ses intentions. La sélection des images définit la valeur d'un poids de pertinence pour chacun des mots clés indexant les images. La valeur de ce poids augmente si une image indexée par ce dernier est sélectionnée, diminue si l'image indexée par le mot clé est refusée et reste la même si l'image demeure neutre (Halin, 1989). Le résultat du choix et le calcul du poids de pertinence sont pris en compte pour la génération à partir d'une nouvelle requête intégrant les mots clés les plus pertinents. L'objectif est d'identifier progressivement les intentions du concepteur en proposant de nouvelles images tout en tenant compte du résultat de la navigation. Le processus s'arrête quand le concepteur est satisfait des propositions suggérées par l'outil.

Trois acteurs (concepteur, interfaces et système) interviennent dans le processus de fonctionnement de l'outil *Day@mbiance*, chacun est responsable d'un ensemble de tâches organisées d'une manière hiérarchique. Ce processus commence par une initialisation du système afin de mettre à zéro le poids de pertinence des différents mots clés indexant les images. Le système génère une première mosaïque d'images d'une manière aléatoire affichée par l'interface et permettant au concepteur de définir ses choix. Le concepteur ordonne la génération d'une nouvelle mosaïque dont le contenu est déterminé à

partir des résultats de la première sélection. Le concepteur répète cette opération en évaluant à chaque fois les images proposées jusqu'à atteindre à un niveau de satisfaction. Cette sensation de satisfaction signifie qu'il a pu, à travers la sélection d'images, formaliser et projeter ses intentions (Cf. Fig 105).

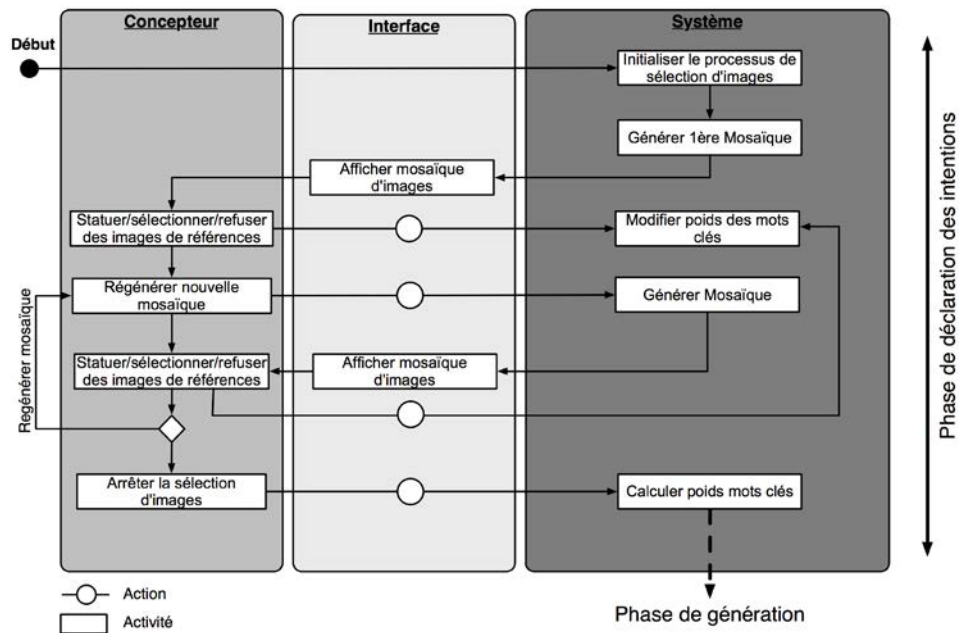


Fig 105. Processus et activités de la phase de déclaration des intentions

La structure de l'outil *Day@mbiance* fait appel à deux modules logiciels : une base de données d'images de références et une application de navigation dans cette base (Cf. Fig 106). Le premier composant est structuré et géré par un gestionnaire de base de données *MySQL*[®] alors que le deuxième est une application développée sous un environnement *PHP*[®] pour parcourir la base d'image avec une interface réalisée sous *Flex*[®] affichée par un navigateur web.

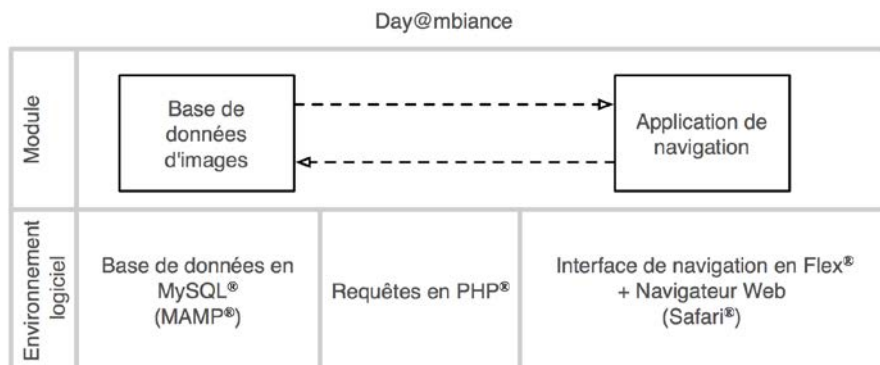


Fig 106. Modules et environnement logiciel d'implémentation de Day@mbiance

2.1.a La base de données d'images

Cette base intègre des images représentant des types d'effets de lumière naturelle extraits d'un ensemble de projets de références. Le choix des images a été obtenu en respectant les critères de sélection (clarté de lecture des effets représentés par l'image, neutralité de représentation des effets produits) définis dans le chapitre précédent (Cf. Partie B.Chapitre I.2). Afin de garantir un bon fonctionnement de l'outil de déclaration d'intention, chacun des six types d'effets de lumière naturelle doit être représenté par un nombre minimum d'images à savoir 50 images sur une base d'images d'un total de 309. Ces images sont indexées par des mots clés issus d'un thésaurus à cinq facettes : dispositif lumineux, quantité de lumière, effet de lumière, surfaces intérieures et usage. Ces facettes décrivent le type d'effets de lumière dans sa dimension quantitative et qualitative ainsi que les propriétés de l'espace architectural ayant une influence sur le comportement lumineux. L'étape d'indexation a été réalisée avec un logiciel de référencement d'images *Image* (Cf. Fig 107). Ce logiciel permet de donner une description du projet architectural représentée dans l'image (nom du projet, adresse, pays, nom du concepteur), une description des propriétés de l'image elle-même (taille en pixel, format, nom de fichier, source) et finalement une description sémantique de l'objet architectural représenté (à travers les mots clés).

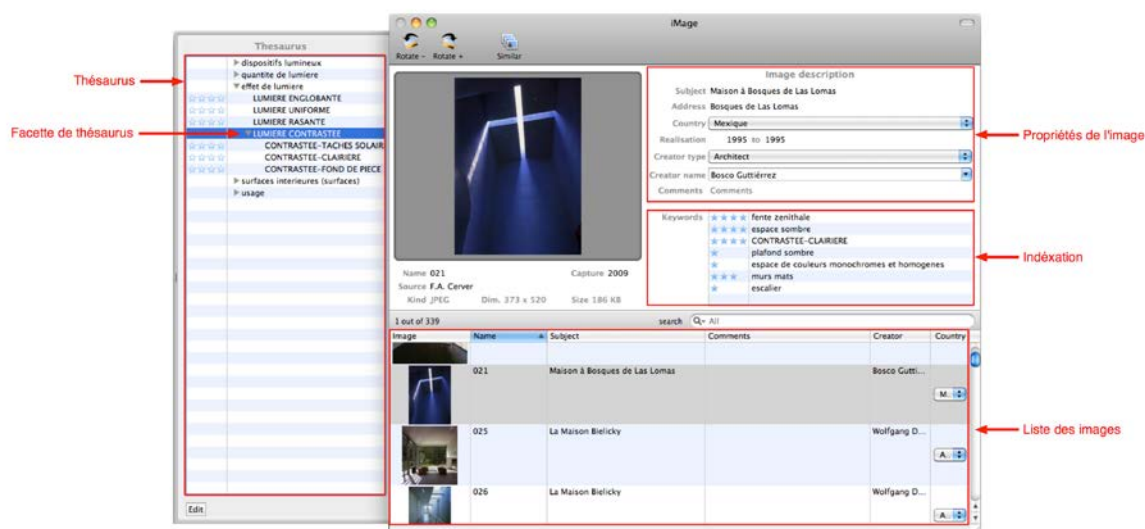


Fig 107. Interface de l'outil d'indexation *Image*

Ces images sont intégrées à une base de données *MySQL*[®] structurée en trois tables. Une première table « *image* » attribuant un identifiant unique à chaque image, un nom, des informations sur le projet représenté et le lien de localisation du fichier. Une deuxième table « *keyword* » créant un identifiant pour chaque mot clé utilisé dans l'indexation des images, un nom, un identifiant par la facette du thésaurus à laquelle appartient le mot clé. La troisième table « *possède* » définit la relation entre les deux premières tables « *image* » et « *keyword* » en listant et en faisant correspondre les identifiants

d'images et les identifiants des mots clés qui les caractérisent tout en indiquant la valeur du poids mesurant la pertinence du concept représenté par le mot clé dans l'image (Cf. Fig 108). Les fonctions de navigation et de sélection intégrées aux deuxièmes composant permettent de parcourir cette base de manière interactive afin d'identifier les mots clés de la facette « *effet de lumière* » ayant le plus de poids correspondant ainsi aux intentions du concepteur.

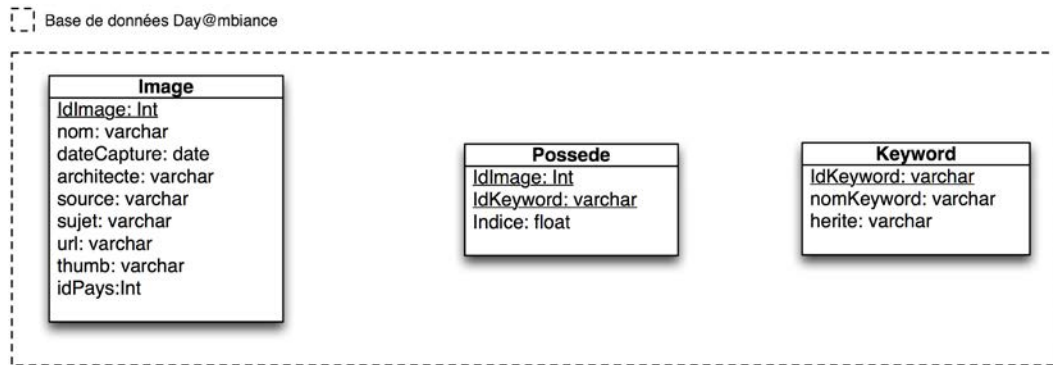


Fig 108. Modèle de la base de données d'images utilisée par Day@mbiance

2.1.b Le module de navigation dans la base de données d'images

C'est une application développée sous l'environnement *Flex*[®] et *HTML*[®] et manipulée à travers un navigateur web. Son interface appelée *Mosaïque* est composée de quatre zones principales (Cf. Fig 109) :

- la zone *résultats* : cette première zone présente le résultat de la génération d'images représentées sous la forme d'une grille de vignettes dont la taille et le nombre sont variables. À partir de cette grille, le concepteur peut sélectionner les images représentant des types d'effets de lumière intéressants en cliquant une fois dessus. Il peut aussi déclarer son refus de l'effet représenté en cliquant deux fois sur l'image. Un indicateur visuel permet de repérer les solutions choisies et les solutions refusées. Le concepteur a la possibilité de garder une neutralité par rapport aux images proposées. Cette neutralité est exprimée en laissant les images telles quelles (ne pas cliquer dessus),
- la zone *génération* : c'est la zone à partir de laquelle le concepteur peut lancer l'opération de génération d'une nouvelle grille d'images prenant en compte le résultat de sa sélection,
- la zone *requêtes* : cette zone rassemble le résultat des différentes sélections effectuées par le concepteur. L'objectif est de constituer un historique de sélection que le concepteur peut parcourir et modifier. L'état d'une image sélectionnée (choisie ou rejetée) lors d'une navigation précédente peut être modifié (rejetée, choisie ou bien considérée comme neutre),
- la zone *boussole* : cette zone intègre un repère de navigation à cinq sommets connectés entre eux par des arcs de cercle. Les sommets correspondent aux cinq facettes qui caractérisent le thésaurus d'indexation des images. Le placement du curseur sur un sommet, au croisement de

sommet ou au milieu de la boussole permet de focaliser la recherche d'images respectivement sur une facette, sur deux facettes ou bien sur l'ensemble des facettes. Ainsi pour une même sélection d'images, le déplacement de la position du curseur change complètement ou partiellement l'orientation du résultat de la génération des images.

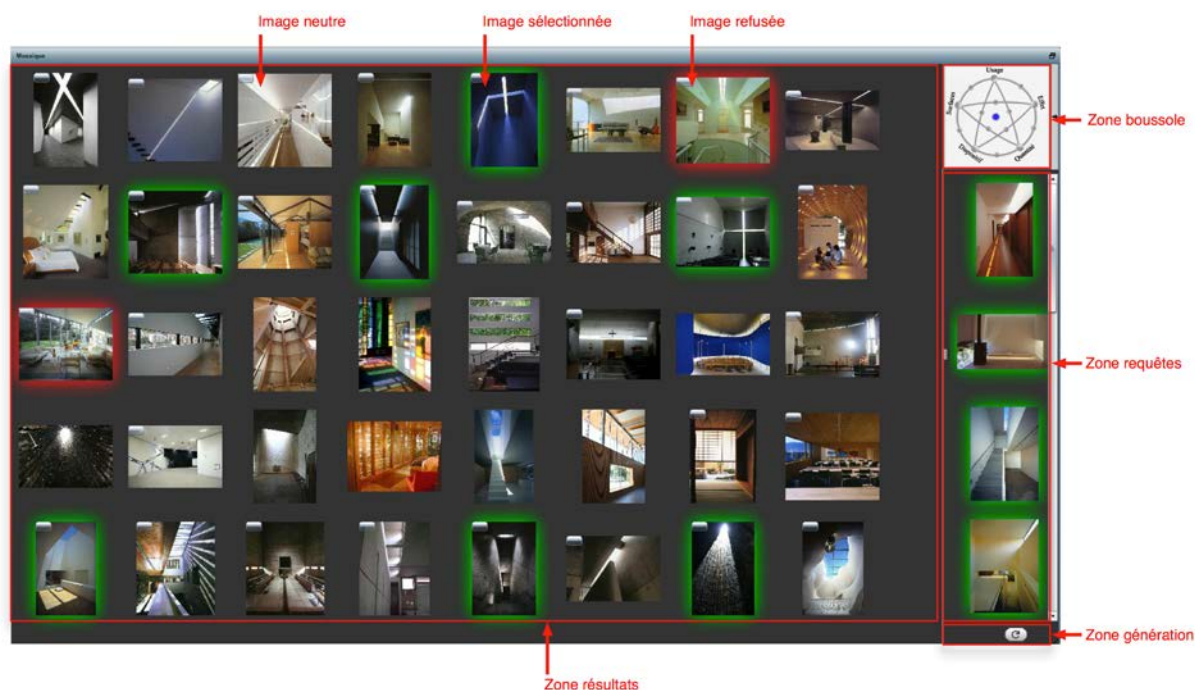


Fig 109. Interface de navigation de Day@mbiance

2.2 Implémentation de la phase de génération de solutions

Nous abordons dans cette partie la méthode d'implémentation des activités qui caractérisent la phase de génération et d'évaluation des solutions en partant de la déclaration des intentions du concepteur. Comme pour la déclaration d'intentions, trois acteurs participent au processus de génération de solutions : le concepteur, une interface d'échange et le système. Ce processus commence par une activité, réalisé par le système, d'identification des intentions du concepteur en analysant les résultats issus de la navigation dans la base d'images en identifiant les mots clés de la facette « effet de lumière » qui ont un poids de pertinence le plus important. Le résultat de l'identification, une liste d'effets triée par ordre d'importance est affichée. Cette liste permet au concepteur de sélectionner le type d'effet à générer. Deux choix se présentent au concepteur, soit il laisse le système sélectionner l'effet ayant le poids le plus fort soit il sélectionne manuellement un type d'effet de lumière parmi la liste proposée. Le mode de sélection manuelle peut être choisi dans le cas où le concepteur n'est satisfait du résultat de l'identification des intentions ou bien dans le cas d'une génération de solutions pour des types d'effets ayant un poids plus faible que le premier de liste. Le résultat du choix de sélection du type d'effet à générer est affiché sur les différentes zones de l'interface à titre d'indicatif pour le concepteur. Ensuite, le système définit une caractérisation physique du type d'effet choisi sous la forme d'une fonction d'optimisation. Le concepteur peut ensuite paramétrer l'activité de génération

de solution en choisissant le nombre d'individus à générer, le mode de mutation et les critères de sélection des solutions. La préparation de la génération de solutions se poursuit par l'activation du moteur d'évaluation du comportement lumineux des solutions à générer. Les activités de préparation se concluent par l'activation du moteur de génération de solutions. Cette activité est assurée par le système qui va générer des solutions sous la forme de configurations architecturales, évaluer leur comportement lumineux afin d'identifier celles qui correspondent à la caractérisation physique du type d'effet choisi. Enfin, il va mémoriser les solutions et leurs propriétés dans une base de données afin de les trier et de les visualiser durant la phase de prise de connaissance. L'activité de génération peut s'arrêter de deux manières différentes : le concepteur, à partir de la visualisation de l'état d'avancement de la génération des solutions, estime que le système est arrivé à atteindre son objectif et peut donc être arrêté. La deuxième manière est automatique, elle est guidée par les paramètres de génération : le système arrête lui même le processus de génération en atteignant un nombre de générations ou un temps de calcul précis (Cf. Fig 110).

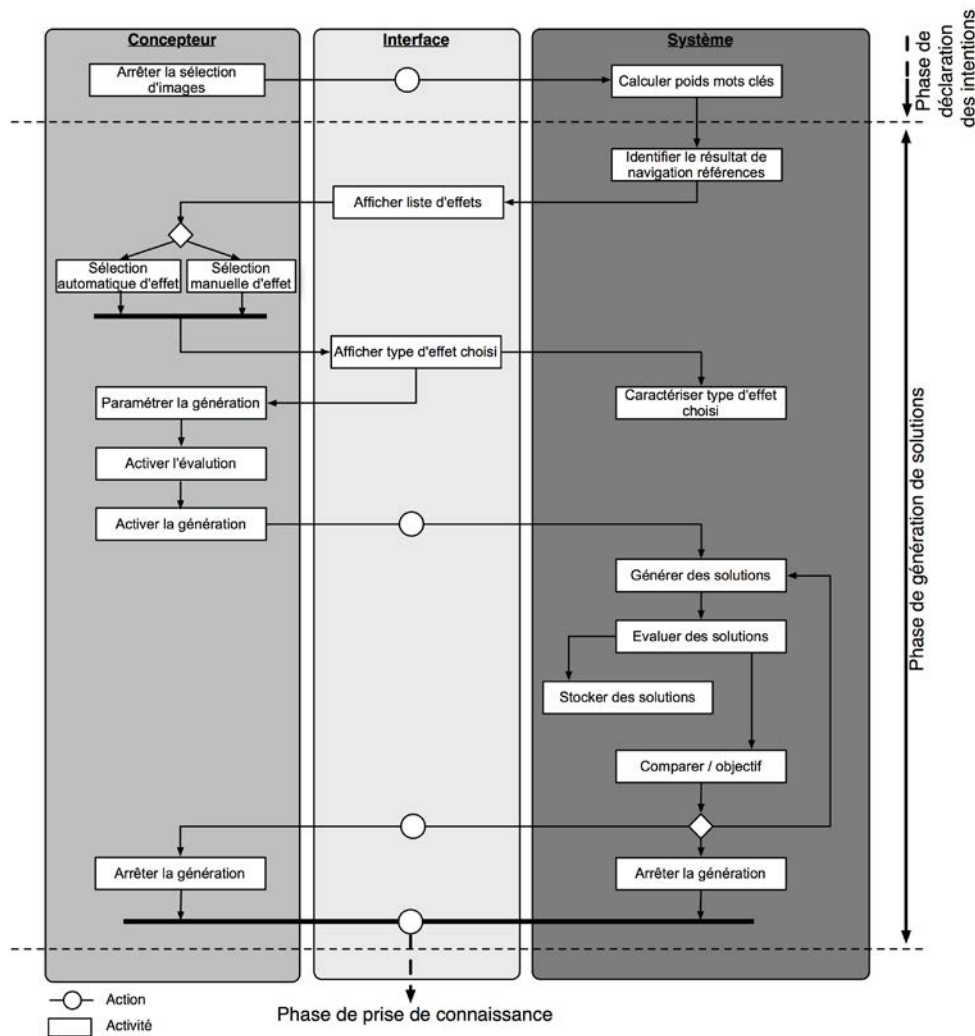


Fig 110. Processus et activités de la phase de génération et d'évaluation des solutions

Ce processus a été implémenté dans un algorithme appelé *DaylightBox* réalisé sous le modèleur 3D *Rhinceros*[®] et son plug-in d'édition d'algorithmes graphiques *Grasshopper*[®]. Cet algorithme met en relation un ensemble de modules et de composants responsables des différentes activités qui caractérisent le processus de génération et d'évaluation des solutions.

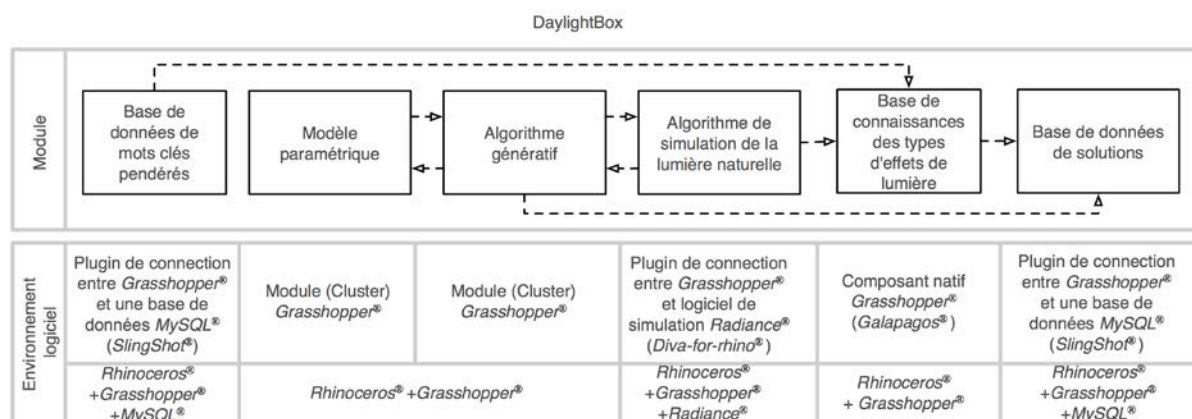


Fig 111. Modules et environnements d'implémentation de *DaylightBox*

2.2.a Accès à la base d'images indexées

Le premier module « *Base de données* » nous offre la possibilité d'accéder directement au contenu de la base d'images de références à partir de l'interface de *Grasshopper*[®] (Cf. Fig 112). Cette interface est divisée en deux zones : une première zone intègre les paramètres d'utilisation du module représentés par des sélecteurs booléens et des listes de choix sur lesquelles l'utilisateur peut agir ; une deuxième zone contient les paramètres de configuration des modules et de composants *Grasshopper*[®] eux-même. Les valeurs de ces paramètres sont propres à la base d'images et ne changent pas d'où la séparation avec les paramètres d'utilisation.

Le module « *Base d'images* » permet de parcourir la table « *Keyword* » en activant le sélecteur booléen (*Toggle*) « *Afficher le résultat de navigation* » et de récupérer ainsi la liste des mots clés ayant une valeur de poids de pertinence strictement supérieur à zéro et appartenant à la facette « *effet de lumière* ». Le résultat du parcours de la base de données est affiché sur une fenêtre (*Panel*) de visualisation de l'interface de *Grasshopper*[®]. Le sélecteur « *Activer la sélection manuelle* » bascule le mode de sélection du type d'effet de lumière naturelle de l'état automatique à manuel. La sélection manuelle se fait à partir d'un menu déroulant listant l'ensemble des effets. Le résultat du choix final, automatique ou manuel, est affiché sur la fenêtre « *effet à générer* ». Ce composant permet de réinitialiser la navigation dans *Day@mbiance* en remettant à zéro le poids de pertinence de l'ensemble des mots clés de la base d'images. Cette fonction est activée à travers le sélecteur « *Réinitialiser Day@mbiance* » dans le cas où l'utilisateur veut refaire une autre déclaration d'intentions.

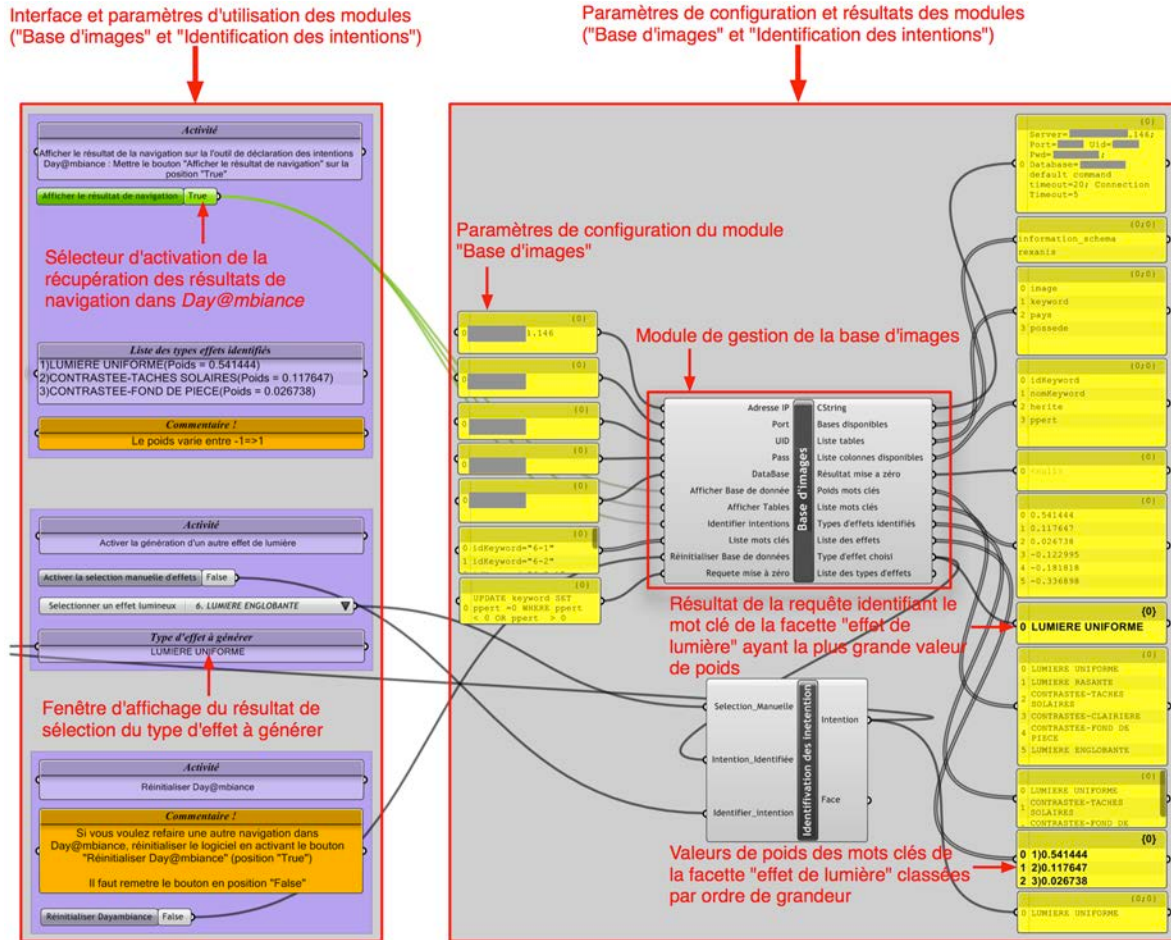


Fig 112. Interface et fonctions des modules d'identification et de sélection des intentions

Le module « *base d'images* » est une association de plusieurs types de composants connectés entre eux et rassemblés dans un seul objet (Cf. Fig 113). Le premier type de composants permet de définir des entrées de données de type chaîne de caractère, liste de valeurs ou de booléens. Les composants d'entrées sont reliés aux composants du plug-in *SlingShot*²³ qui permettent de se connecter, de gérer et de une base de données *MySQL*[®] et de lancer des requêtes directement à partir de *Grasshopper*[®]. Les résultats issus des requêtes sont traités et mise en forme par des composants de gestion de listes propres à *Grasshopper*[®]. Les données traitées sont enfin renvoyées vers des composants de sortie de données formant les sorties du cluster « *base de données* ».

²³ Plugin développé par Nathan Miller, développeur d'outil de conception numérique (<http://slingshot-dev.wikidot.com/grasshopper-db>)

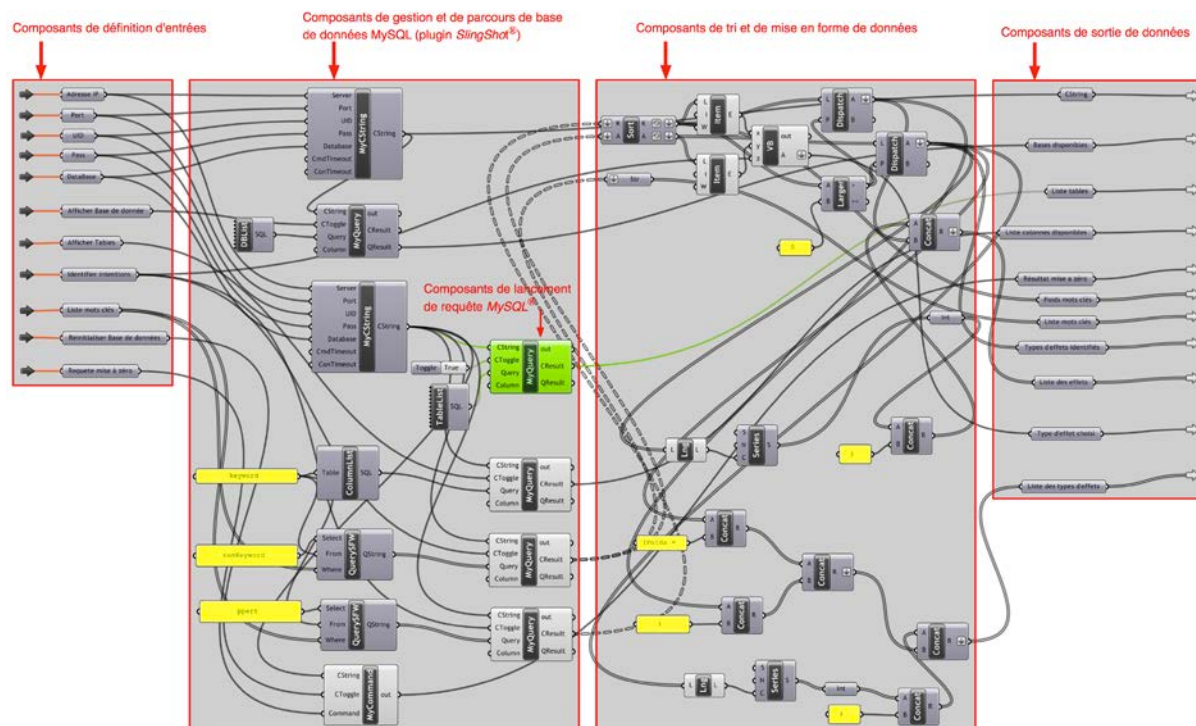


Fig 113. Structure et composants du module "Base d'images"

2.2.b Le modèle paramétrique

L'activité de génération de solutions fait appel à un modèle géométrique paramétrique représentant un espace architectural de forme rectangulaire (Cf. Fig 114). Ce modèle intègre 11 paramètres ayant une influence directe sur la quantité des apports solaires et leurs modes de distribution dans l'espace intérieur. Chaque paramètre a un domaine de variation dont nous avons déterminé les limites. Le modèle paramétrique a été implémenté dans *Grasshopper*® à travers le module « Géométrie » et des *sliders*. Les *sliders* sont des composants *Grasshopper*® de gestion des paramètres d'entrées pour les modules (*cluster*). Ils permettent de déterminer le type de données (entier, réel) et de fixer les limites du domaine de variation pour chaque paramètre du modèle paramétrique. Le concepteur (utilisateur) et l'algorithme génératifs se servent des *sliders* pour faire varier la valeur des entrées du modèle paramétrique et créer des configurations architecturales différentes. Ces entrées sont :

- la largeur, profondeur et hauteur de l'espace : ces trois paramètres sont caractérisés par des valeurs de type « entier » variant entre 250 et 1000 cm,
- le taux d'ouverture de l'espace : ce paramètre définit le rapport entre la surface totale des ouvertures et la surface au sol de l'espace. Il est de type « réel » et varie entre 0.1 et 1,
- l'altitude : ce paramètre définit la distance qui sépare le modèle par rapport au niveau 0. Il est de type « réel » avec un domaine de variation entre 0 et 1000 cm. L'utilisateur peut le modifier selon les contraintes de son contexte de conception,

- la proportion des ouvertures : ce paramètre définit le rapport entre la hauteur et la largeur des ouvertures. Il est de type « entier » et varie entre 1 et 5. La valeur 5 signifie que la largeur de l'ouverture est égale à 5 fois sa hauteur. Chaque rapport de proportion fait référence à un type d'ouverture (1= carrée, 2= rectangulaire, 3= fenêtre en bandeau, 4= fente moyenne, 5= fente fine),
- l'orientation de l'espace : ce paramètre définit l'orientation de la surface verticale de l'espace modelé intégrant des ouvertures. Il est de type « entier » créant des valeurs variant entre 0 et 7 correspondants à des orientations variant entre le sud et le sud-ouest (0= sud, 1= sud-est, 2= est, 3= nord-est, 4= nord, 5= nord-ouest, 6= ouest et 7= sud-ouest). Chaque valeur de paramètre fait référence à une valeur d'angle de rotation que définit le modèle géométrique avec l'axe Y du modeler 3D. Cet axe est considéré par le moteur de simulation comme étant la direction du nord,
- la direction des ouvertures : ce paramètre est de type « entier » peut avoir deux valeurs, 0 pour une direction horizontale et 1 pour une direction verticale,
- le nombre d'ouvertures : ce paramètre définit le nombre d'ouvertures pour chaque géométrie créée par le modèle paramétrique répartie d'une manière équidistante sur la surface d'ouverture. La valeur de ce paramètre varie entre 1 et 10,
- la face d'ouverture : ce paramètre détermine la face du modèle géométrique sur laquelle seront positionnées les ouvertures. Il peut avoir deux valeurs, 0 pour une face verticale et 1 pour une face horizontale,
- Le type de parois²⁴: ce paramètre définit le taux de réflexion des parois intérieures de la configuration spatiale créée par le modèle paramétrique. Il peut avoir 4 valeurs correspondant chacune à un type de parois avec un taux de réflexion bien défini (1= Gris foncé à 20% de réflexion, 2= Gris moyen à 50% de réflexion, 3= Gris clair à 80% de réflexion, 4= Gris très clair à 90% de réflexion),
- le type de vitrage²⁴ : ce paramètre détermine le mode et le taux de transmission de la lumière caractérisant le vitrage des ouvertures du modèle géométrique généré. Il est de type « entier » et varie entre 0 et 2 où chaque valeur correspond à un type particulier de vitrage (0=Simple vitrage à 90% de transmission, 1= Vitrage translucide à 20% de transmission, 2=Double vitrage à 72% de transmission).

À partir de ces paramètres, le module « Géométrie » crée le modèle géométrique et affiche le résultat sur les fenêtres de visualisation de *Rhinoceros*[®]. Les sorties du composant intègrent respectivement l'enveloppe de la pièce créée, ses sommets, ses surfaces d'ouvertures et la valeur du taux d'ouverture

²⁴ La variation de la valeur des deux derniers paramètres n'est pas visible sur le modèle géométrique créé mais intégrée directement dans les fichiers de paramétrage des simulations.

réel. Le taux d'ouverture défini en entrée ne peut pas toujours être vérifié par le modèle paramétrique qui l'adapte en fonction des autres paramètres pour générer une configuration et définir ainsi une nouvelle valeur appelée « *taux d'ouverture réel* ». Les configurations géométriques issues du module « Géométrie » sont intégrées au module de simulation pour évaluer le comportement lumineux de chaque géométrie générée.

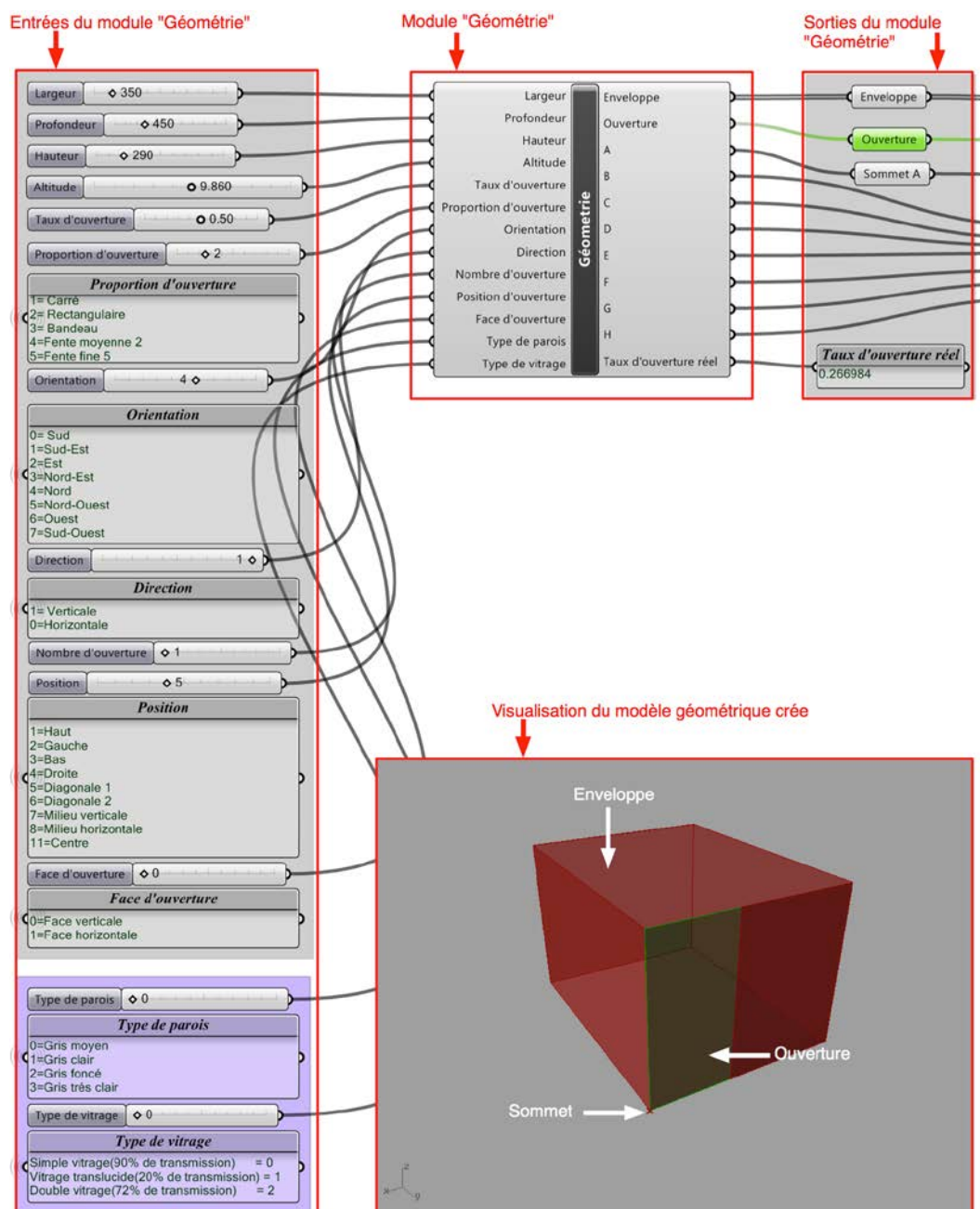


Fig 114. Les entrées, les sorties et la visualisation de la géométrie créée par le module "Géométrie"

2.2.c L'algorithme de simulation de la lumière naturelle

L'évaluation du comportement lumineux des configurations architecturales créées par le module « Géométrie » permet de mesurer le niveau de correspondance à la caractérisation du type d'effet de

lumière choisi par l'utilisateur. Cette activité d'évaluation fait appel au moteur de simulation de la lumière naturelle *Radiance*[®]. Cet outil ne possède pas d'interface de paramétrage ni d'interface de visualisation des résultats de simulation. Nous avons utilisé le plug-in *Diva-For-Rhino*[®] (Jakubiec, Reinhart, 2011) implémenté sous *Grasshopper*[®] qui crée une passerelle entre le logiciel de simulation (*Radiance*[®]) et le module paramétrique « *Géométrie* ». Cette liaison est assurée grâce à des composants qui permettent de définir les paramètres de simulation, d'exporter la géométrie du modèle paramétrique « *Géométrie* » vers *Radiance*[®] et de visualiser les résultats de calculs.

Nous avons intégré les composants de *Diva-For-Rhino*[®] dans cinq modules, chacun ayant une fonction particulière (Cf. Fig 115). Le premier composant « *Grille de calcul* » définit la position, le nombre et la direction des points sur lesquelles la quantité des apports solaires est évaluée. Le deuxième module « *Matériaux* » détermine les propriétés des matériaux qui composent les parois et les surfaces d'ouverture du modèle géométrique et les propriétés des masques extérieurs que l'utilisateur peut définir.

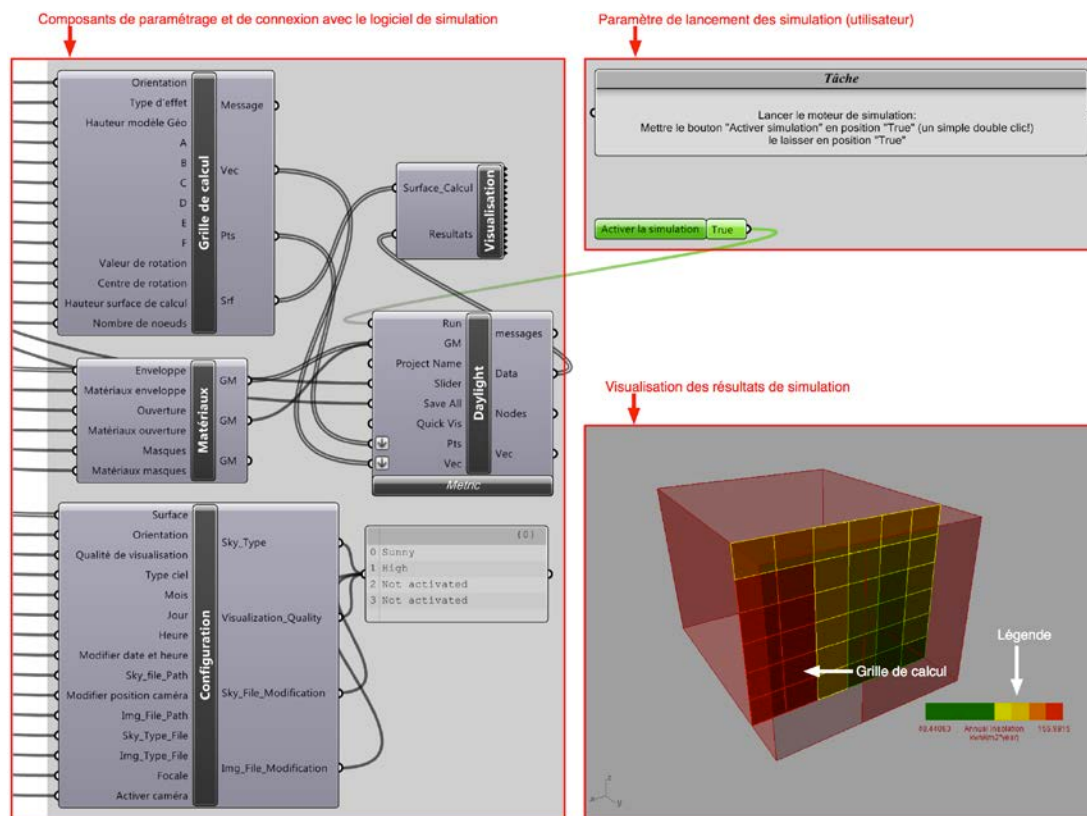


Fig 115. Les modules et les composants de simulation et de visualisation des apports solaires

Le troisième module « *Configuration* » définit les paramètres de fonctionnement du logiciel de simulation. Il permet de déterminer le type de ciel utilisé pour la simulation, la période évaluée, le niveau de précision et la qualité des simulations à réaliser. Le quatrième composant « *Daylight* » récupère les informations issues des autres modules (grille de calcul, matériaux et configuration) pour activer les simulations. Il détermine aussi le type de simulation à partir d'une liste de choix comportant

six possibilités (visualisation, carte de radiation, points de radiation, éclairement, facteur de lumière du jour et autonomie d'éclairage). Le dernier module « *visualisation* » crée une grille de surfaces ayant comme centres les points de calcul. Une couleur est attribuée à chaque surface variant du rouge au vert et prenant comme référence les résultats de simulation calculés sur la grille de points (le rouge pour les valeurs maximales et le vert pour les valeurs minimales). Cette légende crée une lecture visuelle et graphique des résultats de simulation les rendant plus accessibles pour l'utilisateur. Pour les besoins de notre méthode de génération, nous avons fait le choix de prendre comme référence « *points de radiation* » comme type de simulation. Il permet de définir, sur une grille de points, la quantité des apports solaires sur une durée d'une année en prenant en considération la variation des conditions d'éclairage sur cette période. Nous avons fixé les valeurs attribuées aux paramètres de configuration de ces modules en laissant à l'utilisateur la tâche d'activer ou d'arrêter la simulation.

2.2.d L'algorithme génératif

Cet algorithme est directement implémenté dans *Grasshopper*[®] sous la forme d'un composant natif appelé *Galapagos*[®] (Cf. Fig 116). Ce dernier fait appel à des algorithmes évolutionnaires pour varier les valeurs des paramètres d'entrée du modèle paramétrique « *Genome* » et chercher à atteindre un objectif « *Fitness* » qui correspond à la caractérisation du type d'effet de lumière déclaré par le concepteur. Ce composant possède une interface de commande qui permet de définir ses paramètres de fonctionnement comme le nombre de générations, le nombre d'individus pour chaque génération, le nombre de générations pour initialiser le processus et l'objectif qu'il doit atteindre. Cet objectif est de minimiser, de maximiser ou d'atteindre une valeur bien précise lors du calcul du « *Fitness* ». Nous avons fixé par défaut ces paramètres en choisissant 10 générations constituées chacune de 50 individus, 2 générations d'initialisation et pour objectif de minimiser la valeur du « *Fitness* ». Le choix de ces valeurs est optimisé pour un temps de calcul ne dépassant pas 30 minutes. L'utilisateur interagit avec ce composant en sélectionnant les paramètres sur lesquelles l'algorithme génératif peut agir en modifiant leurs valeurs. Les paramètres non sélectionnés restent neutres et ne participent pas au processus génératif et gardent leur valeur initiale. Cette valeur doit être définie par le concepteur en la saisissant sur le *slider* correspondant au paramètre. Cette valeur correspond à un choix que le concepteur a déjà précisé. Les paramètres participant au processus de génération doivent être connectés au composant *Galapagos*[®], les autres doivent être déconnectés tout en ayant une valeur fixe. La sélection d'un paramètre est matérialisée par une ligne rouge qui le relie au composant *Galapagos*[®] et un contour rouge qui encadre le *slider*. Cet algorithme fonctionne selon un processus itératif d'optimisation est organisé en cinq étapes :

1. variation des valeurs des paramètres connectés
2. génération d'un modèle géométrique

3. évaluation des apports solaires de la configuration créée (sur la grille de calcul) et calcul de la valeur de la fonction de caractérisation.
4. comparaison par rapport aux objectifs
5. Mutation et croisement des solutions

Ce processus génère un ensemble de configurations spatiales considérées comme des solutions potentielles respectant les contraintes posées par l'utilisateur.

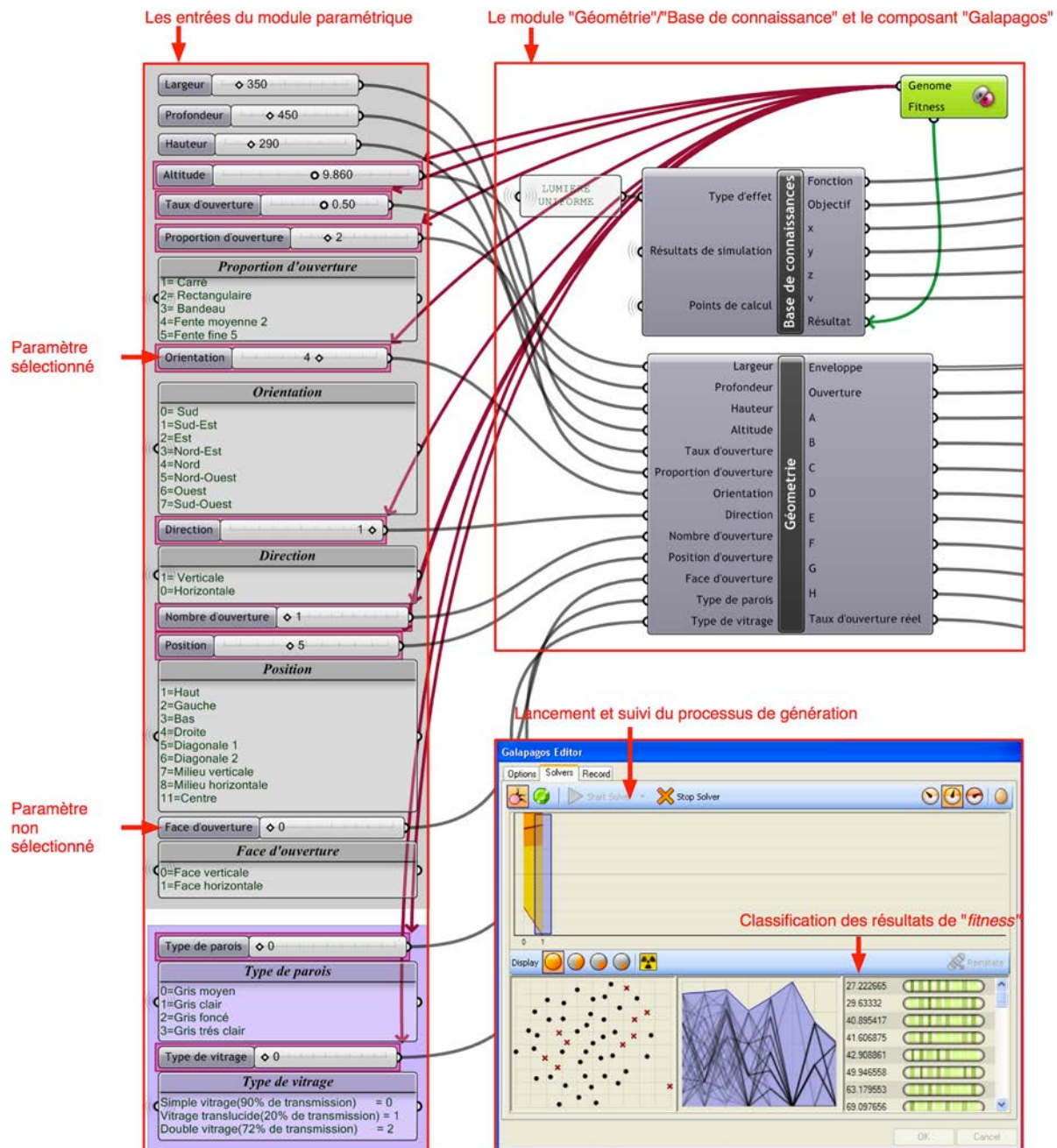


Fig 116. Paramètres d'entrée et de configuration de l'algorithme génératif "Galapagos®"

2.2.e La base de connaissance des types d'effets de lumière

Les types d'effets de lumière naturelle identifiés dans le premier chapitre de cette partie sont caractérisés dans ce système par des fonctions d'optimisation considérées comme un objectif à atteindre par le moteur génératif. Ces fonctions sont constituées d'indicateurs quantifiant les apports solaires et identifiant leurs modes de répartition comme la moyenne et l'écart type des valeurs des apports solaires calculées sur différents points ou zones de l'espace architectural. Ces fonctions ont été optimisées afin de correspondre aux besoins d'un outil de génération de solutions architecturales. Afin de préparer l'implémentation de l'activité de caractérisation des intentions, nous avons défini une base de connaissances des types d'effets de lumière. Elle structure les relations entre les entités participant à la caractérisation des effets de lumière à savoir : les types d'effets, les fonctions de caractérisation, les indicateurs et les valeurs attribuées à ces indicateurs.

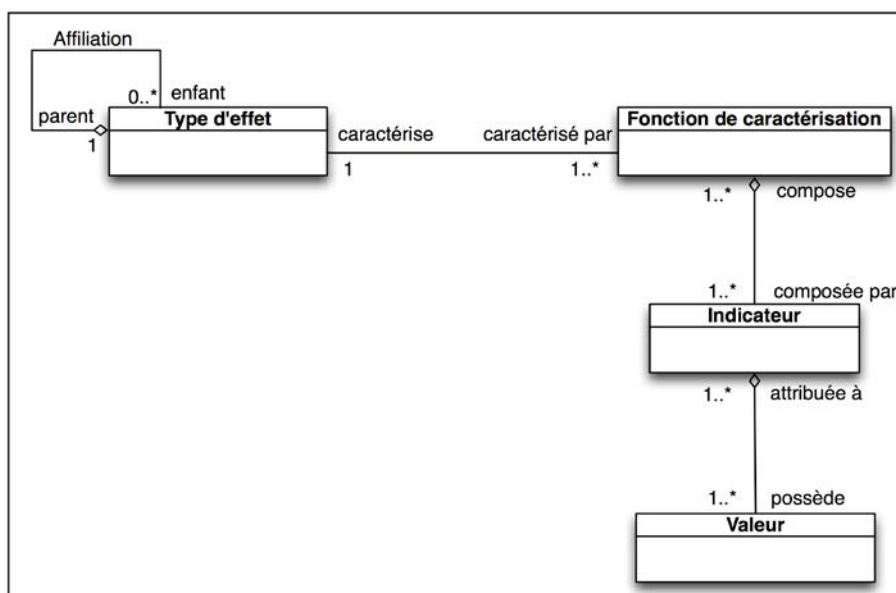


Fig 117. Modélisation de la base de connaissances

Ce modèle a été implémenté dans le module « *Base de connaissance* » sous l'environnement *Grasshopper*[®]. Ce dernier possède trois entrées : la première définit le type d'effet de lumière que l'utilisateur a choisi, la deuxième entrée intègre la liste des positions des points de calcul utilisés pour les simulations et enfin la troisième entrée permet de récupérer les résultats des simulations réalisées sur chaque configuration générée. Le module « *Base de connaissance* » propose quatre sorties : une première qui indique la fonction de caractérisation du type d'effet, la deuxième précise l'objectif à atteindre pour cette fonction (la valeur qu'elle doit avoir pour décrire le type d'effet que l'utilisateur cherche à créer), la troisième sortie définit la liste des variables de la fonction (les indicateurs) et enfin la quatrième sortie détermine le résultat du calcul de la fonction de caractérisation. L'objectif de la fonction de caractérisation et son résultat de calcul sont utilisés par le moteur génératif comme référence pour orienter la génération des solutions (Cf. Fig 118).

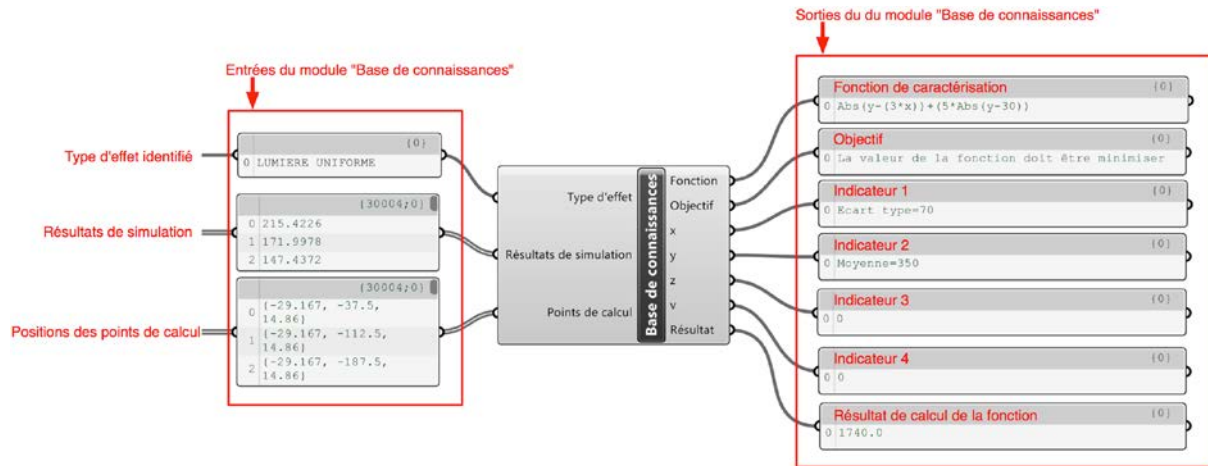


Fig 118. Entrées et sorties du module "Base de connaissances"

2.2.f La base de données de solutions

Les solutions issues de l'activité de génération sont mémorisées dans une base de données afin de pouvoir les trier et les présenter à l'utilisateur comme résultats à la description de ses intentions. Nous avons choisi comme support de stockage une base de données *MySQL*[®] contenant les propriétés des solutions générées. Chaque élément de la base correspond à une solution dont la description est structurée en 15 colonnes. La première colonne attribue un identifiant pour chaque solution, la deuxième contient la valeur de la fonction de « *Fitness* », la troisième mémorise le chemin de la localisation du modèle géométrique de la solution générée et 12 autres colonnes contiennent les valeurs des paramètres d'entrée du modèle paramétrique (taux d'ouverture, nombre d'ouverture, ...) (Cf. Fig 119).

Solution					
Id: int					
fitness: decimal					
aperture_rate: float					
aperture_scale: int					
Orientation: int					
Direction: int					
aperture_number: int					
position: int					
geometry_material: int					
aperture_material: int					
x: int					
y: int					
z: int					
Path: text					
aperture_face: int					

id	121	122	123	124
fitness	35.92	35.92	96.38	96.38
aperture_rate	0.8	0.8	0.77	0.77
aperture_scale	2	2	3	3
Orientation	1	1	2	2
Direction	0	0	0	0
aperture_number	1	1	1	1
position	3	3	10	10
geometry_material	2	2	0	0
aperture_material	1	1	1	1
x	350	350	350	350
y	450	450	450	450
z	290	290	290	290
Path	D:\Documents de Anis\Essai de logiciel\GrassHopper...	D:\Documents de Anis\Essai de logiciel\GrassHopper...	D:\Documents de Anis\Essai de logiciel\GrassHopper...	D:\Documents de Anis\Essai de logiciel\GrassHopper...
aperture_face	0	0	0	0

Fig 119. Structure et extrait de la base de données des solutions

Cette base de données nous offre la possibilité de mettre en place des critères de tri et de sélection à différents niveaux de précisions en associant des propriétés de nature géométrique et physique assurant ainsi une sélection fine et ciblée des solutions. Le composant « *Stockage solution* » implémenté sous l'environnement *Grasshopper*[®] crée et gère la base de données de solutions sous *MySQL*[®]. Il fait appel à des modules du plug-in *Slingshot*[®] de gestion de base de données à partir de

l'interface de *Grasshopper*[®]. L'utilisateur doit créer une table pour enregistrer les résultats de chaque session de génération en lui attribuant un nom. Il dispose de fenêtres d'aide, de liste de choix de sélecteurs booléens lui permettant de saisir (d'une manière normalisée) le nom de la session, de créer la table de solutions et d'activer l'enregistrement des propriétés des solutions. Les résultats de ces actions sont affichés sur des fenêtres de visualisation de type *panel*.

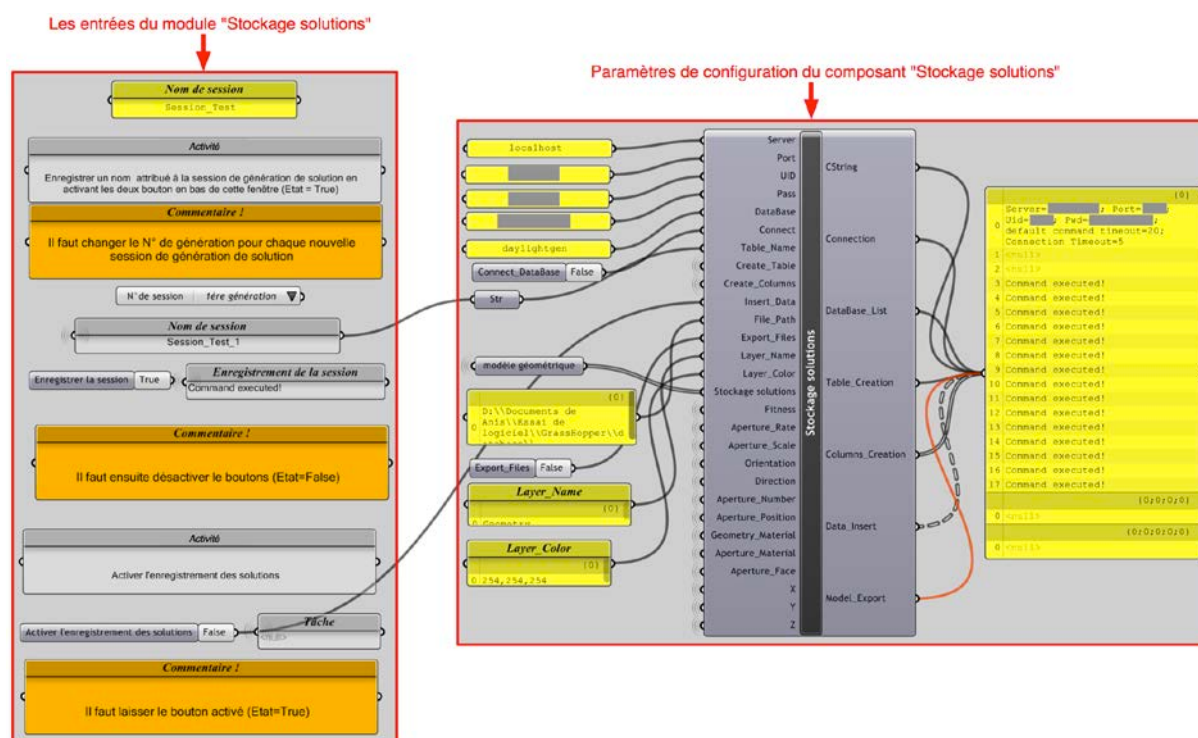


Fig 120. Paramètres d'entrée et de configuration du module "stockage solution"

2.3 Implémentation de la phase de prise de connaissance

La phase de prise de connaissance et une phase d'évaluation des solutions générées qui fait appel aux trois acteurs participant au fonctionnement de l'outil d'aide à la conception. Le concepteur (premier acteur) est responsable des activités de tri, d'analyse, d'identification et de sélection des solutions ayant un potentiel créatif. Il est également en charge des activités d'appropriation des solutions en les transformant et en les adaptant à ces attentes. Ces activités font appel aux capacités d'interprétation du concepteur qui, en parcourant les solutions générées, se construit de nouvelles idées avec la possibilité de les tester et les faire évoluer pour développer son projet. Le système (deuxième acteur) offre au concepteur la possibilité de définir les critères de tri des solutions, d'évaluer leur comportement lumineux et de vérifier leur niveau de conformité avec ses intentions. Le concepteur dispose aussi d'un outillage de modélisation géométrique et physique lui permettant de transformer les solutions choisies et de les évaluer à travers un processus itératif organisé en trois étapes : proposition, évaluation et modification. L'interface (troisième acteur) participe au processus de prise de connaissance en proposant des modes de représentations des résultats de génération et d'évaluation

capables de révéler les qualités des solutions. Ces modes de représentations aident le concepteur dans la lecture des solutions proposées et leur interprétation projectuelle.

Le concepteur commence cette phase de prise de connaissance en définissant les options d'affichage permettant au système de trier la base de solutions qu'il a constituée (Cf. Fig 121). Une collection de solutions est présentée via l'interface comme résultat de l'activité de tri de solutions. L'utilisateur peut ainsi parcourir cette collection en visualisant certaines propriétés comme la taille d'ouverture ou la composition des parois. Il peut aussi sélectionner celles qui l'intéressent pour en visualiser l'effet, la quantité et le mode de répartition de lumière qu'elles produisent. À partir de cette navigation et des résultats des évaluations, le concepteur dispose de plusieurs choix :

- réévaluer les solutions sélectionnées selon d'autres critères,
- parcourir l'espace des solutions en sélectionnant de nouvelles,
- redéfinir les critères de tri des solutions pour afficher une nouvelle collection,
- relancer le processus de génération des solutions en sélectionnant de nouveaux paramètres de génération ou en relançant le processus de déclaration des intentions,
- arrêter le processus et quitter l'outil,
- choisir une solution ou plusieurs solutions.

La solution choisie peut être transformée afin de la faire correspondre à une nouvelle idée ou de l'adapter au contexte de conception. Une solution transformée peut être également évaluée selon le même processus d'évaluation et de décision que les solutions générées par l'outil.

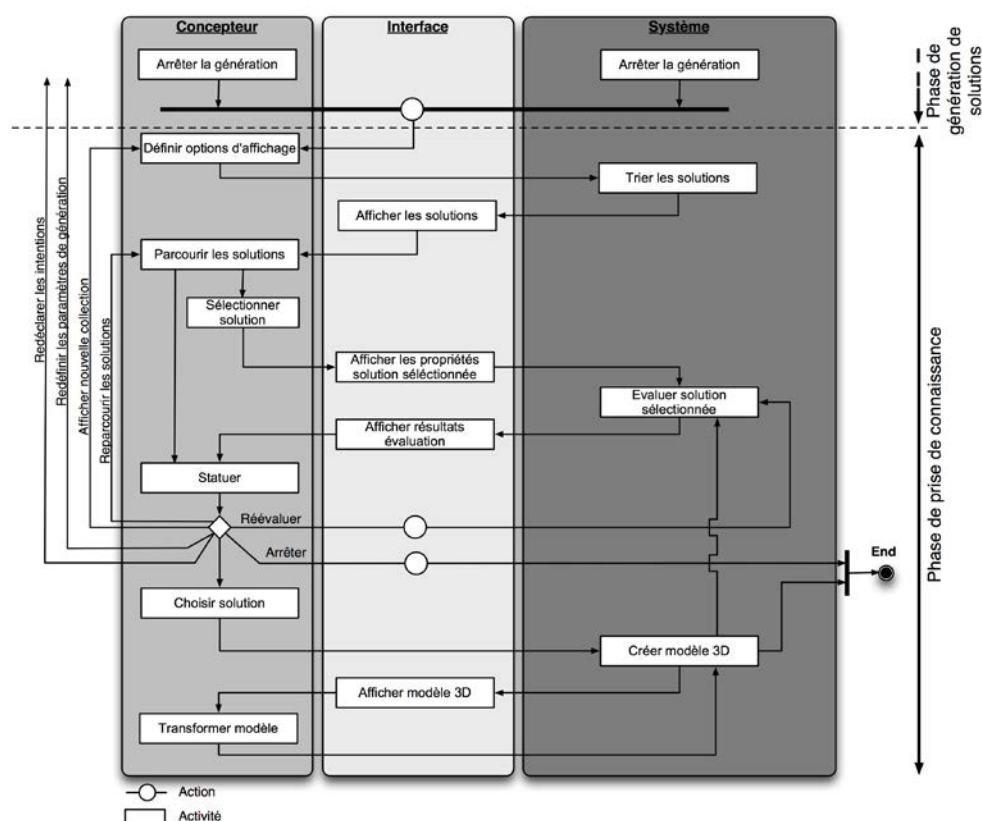
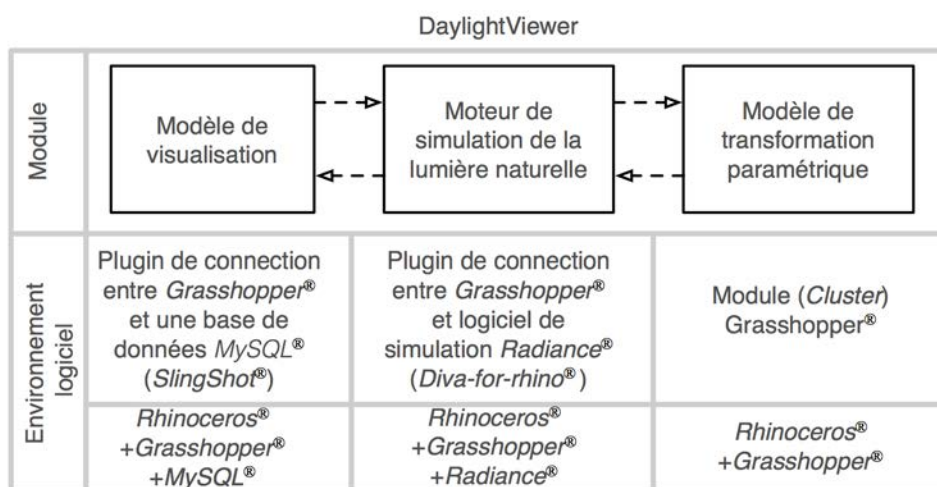


Fig 121. Processus et activités de la phase de prise de connaissance

Le processus de la phase de prise de connaissance a été implémenté dans un algorithme *Grasshopper*[®] que nous avons appelé *DaylightViewer* (Cf. Fig 122). Il intègre un premier module de tri et de visualisation des solutions générées, un deuxième pour l'évaluation du comportement lumineux des solutions choisies et enfin un troisième composant de transformation géométrique selon une méthode paramétrique. L'ensemble de ces modules est mis à disposition de l'utilisateur avec des annotations expliquant le mode d'utilisation de chacun.

Fig 122. Modules et environnements d'implémentation de *DaylightViewer*

2.3.a Le modèle de visualisation

Le premier module de « *visualisation* » crée une connexion avec la base de données de solutions. Il récupère les valeurs d'identification (valeur de l'identifiant) et de caractérisation (dimensions, taux d'ouverture, nombre d'ouvertures) des solutions pour reconstruire leur géométrie et les afficher sur les fenêtres de visualisation de *Rhinoceros*® (Cf. Fig 123). Ce composant offre à l'utilisateur la possibilité de définir des critères de sélection des solutions à visualiser. Il peut choisir d'afficher le résultat d'une session particulière de génération en saisissant son nom dans le *panel* « *nom de session* ». Le *slider* « Nombre de solution » permet de définir le nombre n de solutions à afficher. À partir de ces informations, et en activant le sélecteur booléen « *Importer les solutions* », le module parcourt la table des solutions portant le nom de la session, classe les solutions selon leur valeur de « *fitness* » dans un ordre croissant pour finalement sélectionner les n premières.

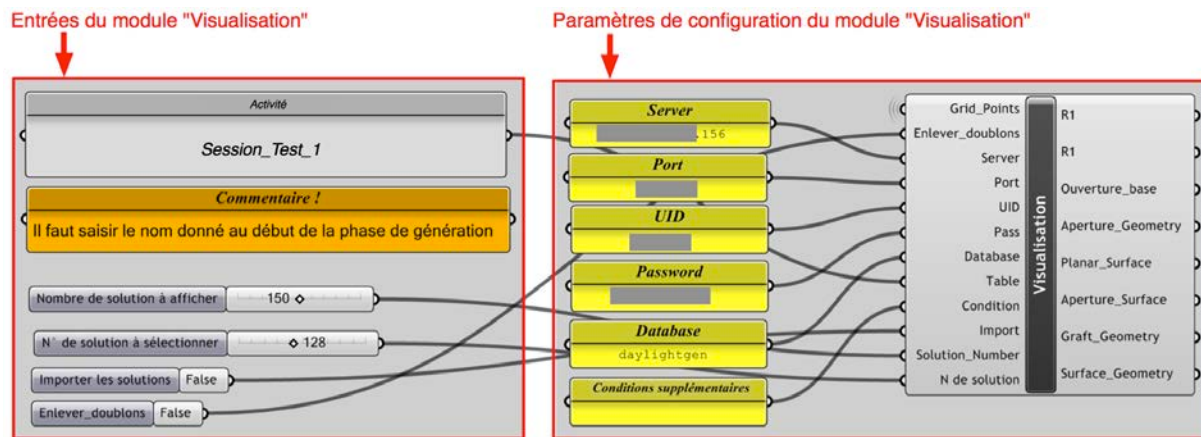


Fig 123. Les entrées et les paramètres de configuration du module « *Visualisation* »

Les solutions sélectionnées sont affichées sur la forme d'une grille dans l'ordre de sélection (la première a la valeur de « *fitness* » la plus faible et la dernière la plus forte). Un code de couleur permet de rendre ce classement plus intelligible pour l'utilisateur. La première solution a une couleur verte alors que la dernière a une couleur rouge avec un dégradé vert clair, jaune et orange pour les solutions intermédiaires. Cette forme de visualisation propose un mécanisme d'information tout en aidant l'utilisateur à naviguer dans l'ensemble des solutions et à repérer celles l'intéressent grâce au numéro de la solution indiqué au niveau du sol. Le *slider* « N° de solution à sélectionner » permet de sélectionner une solution particulière de la grille et ainsi avoir une vue détaillée et plus précise. Cette sélection est accompagnée d'un ensemble d'informations présenté sous la forme d'une liste positionnée en haut de chaque solution. Cette liste permet de visualiser des propriétés cachées comme l'orientation des faces d'ouverture, la surface d'ouverture, le type de parois ou le type de vitrage, aidant l'utilisateur à statuer sur les solutions (Cf. Fig 124). Le module « *visualisation* » propose deux autres fonctions de filtrage des solutions affichées. La première fonction permet d'enlever les doublons. L'utilisateur peut faire appel à cette fonction dans le cas où les solutions affichées

présentent un fort degré de similitude. Cette fonction supprime les solutions ayant la même valeur de *fitness*. La deuxième fonction de filtrage propose une interface de saisie de conditions supplémentaire que l'utilisateur peut saisir. Cette fonction nécessite quelques connaissances en langage *MySQL*®.

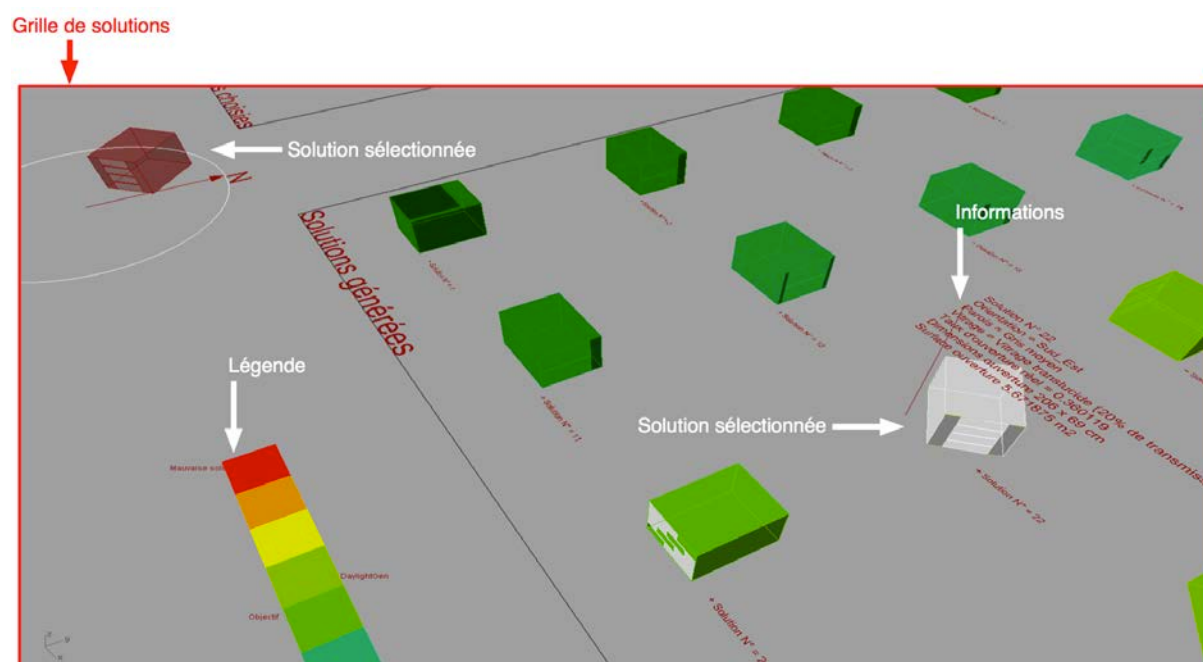


Fig 124. Affichage de la grille de solutions sous *Rhinoceros*®

2.3.b Le moteur de simulation de la lumière naturelle

Une solution sélectionnée peut être évaluée afin de révéler l'effet de lumière naturelle qu'elle crée. Cette vérification est possible grâce à la mise en place du module « *vimulation* ». Il crée une passerelle entre *Grasshopper*® et le logiciel de simulation *Radiance*®. La lumière naturelle est un phénomène variable dans le temps et influencé par les conditions climatiques (type de ciel). De ce fait, le composant « *Daylight* » propose à l'utilisateur une interface de paramétrage des simulations permettant de définir un type de ciel, une date et une heure de simulation et un type de simulation (qualitative ou quantitative).

Le module « *vimulation* » crée une interface de visualisation des résultats des simulations. Le premier mode de visualisation représente, dans les fenêtres d'affichage de *Rhinoceros*®, les simulations quantitatives (de type FLJ ou éclairage) sous la forme d'une grille de surfaces de calcul et d'une légende colorée (un dégradé de couleur variant du vert et rouge suivant la valeur calculée au centre de chaque surface). Le deuxième mode d'affichage est adapté aux visualisations de simulations dont les rendus photo réalistes et les représentations des luminances en fausses couleurs. Il fait appel à l'interface *wxfalsecolor*® permettant de visualiser les rendus issus du logiciel de simulation de *Radiance*®. Le nom attribué aux fichiers images issus des simulations est construit à partir du numéro de la solution dans la grille ainsi et de son origine (solution générée ou solution personnalisée).

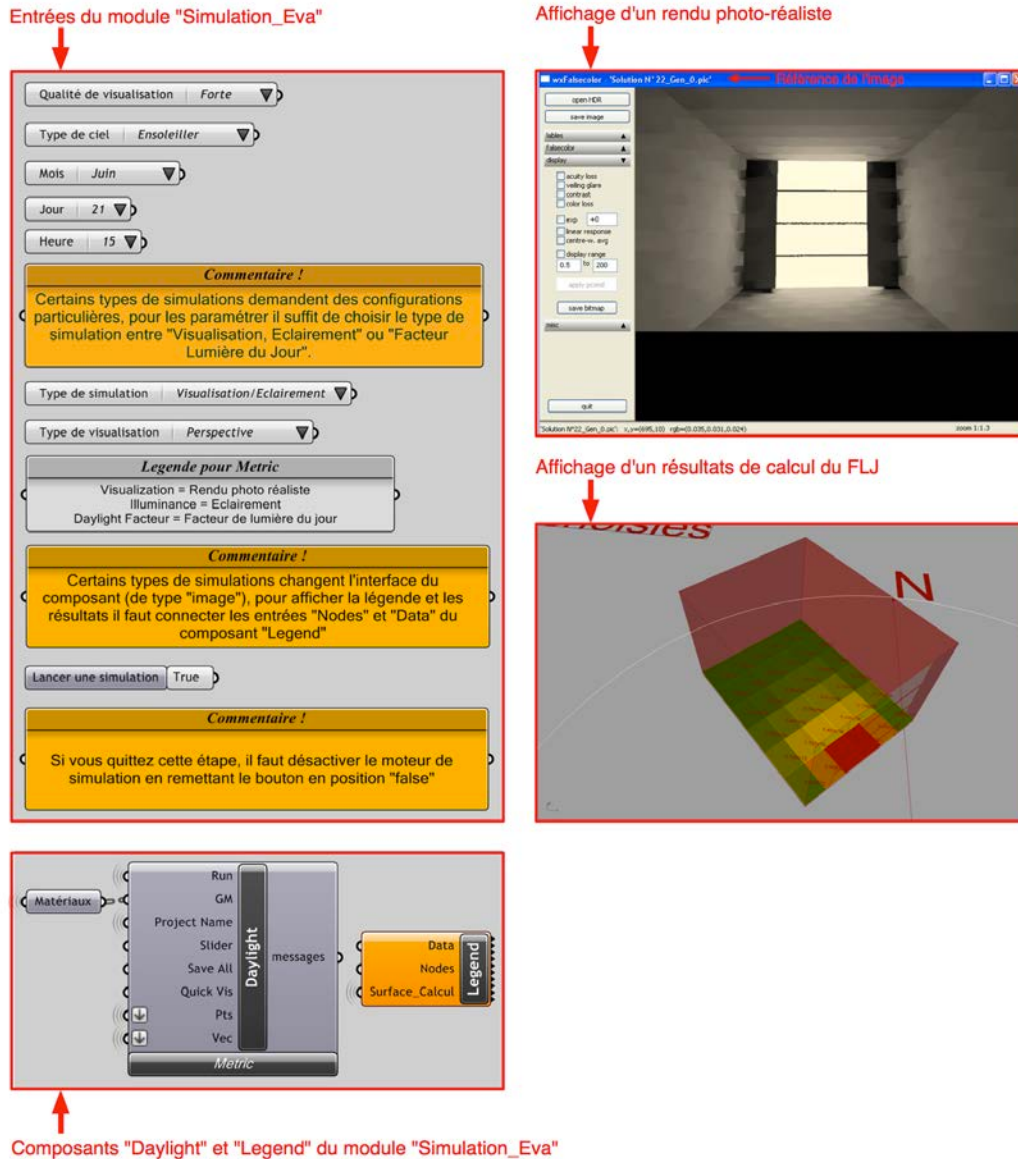


Fig 125. Les entrées et les résultats du composant "Daylight"

2.3.c Le modèle de transformation paramétrique

Le module « *Géométrie_Per* » offre la possibilité à l'utilisateur de transformer une solution choisie à partir de celles de la collection générée. Ce module présente à l'utilisateur une liste de *sliders* et de listes de choix qui rendent la transformation possible en modifiant les valeurs attribuées aux paramètres de modélisation de la solution choisie (Cf. Fig 126).

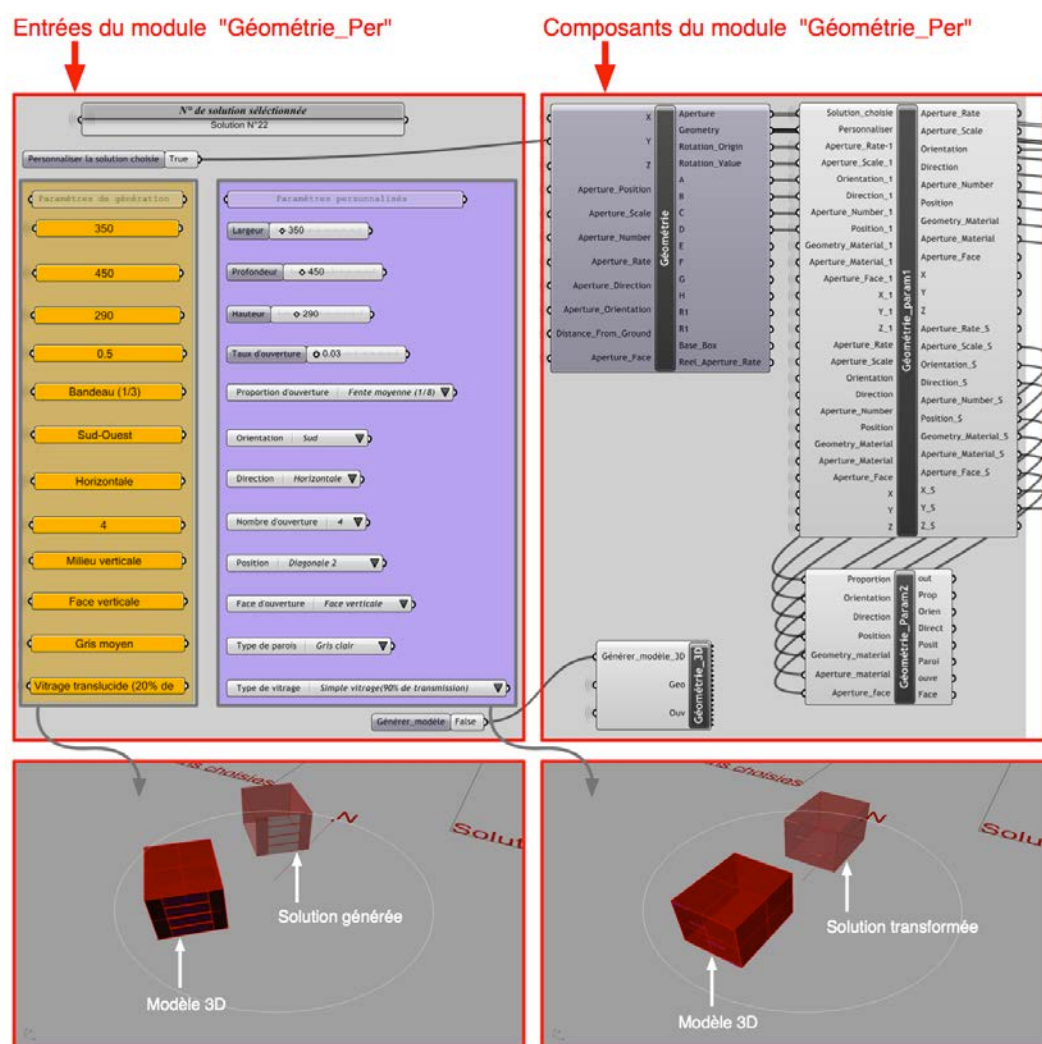


Fig 126. Interface de personnalisation des solutions générées

Ce module affiche la liste des valeurs attribuées aux paramètres de configuration de la solution choisie. Le concepteur peut ainsi garder certaines caractéristiques de la solution choisie et en modifier d'autres. L'activation du sélecteur de booléen « *Personnaliser la solution choisie* » applique les transformations de l'utilisateur en injectant les nouvelles valeurs saisies dans le modèle paramétrique. Cette opération crée une nouvelle configuration dont le comportement et l'effet lumineux peuvent être évalués de la même manière que pour les solutions générées. Les résultats de cette évaluation sont identifiés (avec un nom comportant un indicatif « *Per* ») afin qu'elles puissent être comparées avec les résultats des évaluations des solutions générées. Afin de matérialiser les résultats des générations et des transformations, l'utilisateur peut générer des modèles 3D de ces configurations pour les utiliser directement dans *Rhinoceros*® ou bien les exporter en différents formats vers d'autres logiciels de simulation et de modélisation géométrique.

3. Synthèse

Nous avons pu à travers cette partie définir le mode d'implémentation de la méthode d'aide que nous avons proposée en un outil d'aide à la conception. D'abord, cette implémentation a été présentée en détaillant le processus de fonctionnement de cet outil et en identifiant les acteurs et leurs activités respectives. Ensuite, nous avons défini le processus de développement informatique de cet outil. Cette étape a permis de décrire les environnements logiciels que nous avons choisis pour mettre en œuvre les différentes activités identifiées. Cette étape s'est poursuivie par la description des différents composants de cet outil et de leur mode d'utilisation. Nous avons conclu cette étape par une description du processus que nous avons établi pour définir les fonctions de caractérisation des types d'effet de lumière qui ont été mises en œuvre pour la génération des solutions.

La partie suivante se propose de confronter l'usage de cet outil à un contexte réel de conception dans l'objectif de mettre en avant ses apports cognitifs et fonctionnels dans la pratique de la conception architecturale avec un public d'étudiants en cours ou en fin de formation en architecture. Cette évaluation sera également l'occasion de relever les limites de ce dispositif d'assistance et les perspectives qu'il peut initier dans le cadre du développement des méthodes génératives d'aide à la conception.

Partie C. Expérimentation et validation de la méthode et de l’outil d’assistance

Chapitre I. Protocole d'expérimentation

Nous présentons dans ce chapitre le processus d'expérimentation que nous avons suivi pour la validation de notre méthode d'assistance. Il sera question de définir le support utilisé, les participants ainsi que les phases de déroulement du processus expérimental.

Nous essayons, à travers ce protocole d'expérimentation, de déterminer la capacité de notre méthode d'assistance à accompagner le concepteur à prendre en compte les ambiances de lumière naturelle durant les phases conceptuelles de son projet. Il s'agit d'évaluer :

- l'adaptation des activités et des fonctions proposées aux phases conceptuelles du projet,
- la capacité de prendre en considération l'incertitude qui caractérise ces phases du projet,
- la capacité d'exploration et de recherche qu'offre la méthode d'assistance,
- le potentiel créatif de la méthode,
- la capacité de la méthode à prendre en compte et satisfaire les intentions du concepteur,
- la capacité de l'outil proposé à assister une activité de conception durant les phases amont.

Ce processus est inspiré de la méthode d'expérimentation mise en place par le laboratoire *SITCOM-interpsy* (Schmitt et al., 2012) utilisée pour la validation de l'outil *Day@mbiance* (Fixmer et al., 2010) et l'outil *Ec-Co-Gen* (P Marin et al., 2012). Elle consiste à créer un cadre expérimental de conception d'un projet d'architecture dans lequel deux acteurs interagissent pour proposer une esquisse tout en se faisant assister par l'outil *DaylightGen*. Ce processus est divisé en trois phases : une phase de formation, une phase d'expérimentation et une phase d'analyse.

La première phase permet de préparer les acteurs à l'utilisation de l'outil d'assistance. Nous avons organisé des sessions de formation d'une durée d'une heure pour chaque groupe d'acteur afin de présenter le cadre de l'expérimentation, les objectifs de la méthode d'assistance et le mode d'utilisation de l'outil qui en découle. Nous avons ainsi expliqué le déroulement des sessions d'expérimentation, la durée des sessions et le dispositif matériel à utiliser. Nous avons présenté également l'interface, les composantes et les fonctions de l'outil *DaylightGen*. Les participants ont pu ainsi s'approprier l'outil proposé avant le début des sessions d'expérimentation.

La phase d'expérimentation est organisée en sessions de conception d'une durée de trois heures pendant lesquelles un binôme de participants est appelé à concevoir une esquisse d'un projet en utilisant l'outil d'assistance *DaylightGen*. Nous avons proposé aux étudiants un programme de conception contenant le type et la fonction des espaces à concevoir ainsi que le terrain d'implantation du futur projet. Ce programme met l'accent sur l'importance de l'intégration de la lumière naturelle dans les projets à concevoir. A la fin du processus d'expérimentation, un questionnaire en ligne est soumis aux étudiants (Cf. Annexe 6). Ce questionnaire de retour d'expérience comporte des questions qui visent à récolter les remarques des participants par rapport à la méthode d'assistance, l'outil utilisé, le projet conçu et les modifications à apporter pour améliorer l'outil.

Le processus d'expérimentation est clôturé par une phase d'analyse des résultats. Cette phase consiste à analyser les différents supports issus de l'expérimentation et à évaluer les apports de la méthode d'assistance dans ce contexte de conception. Cette phase d'analyse se divise en deux parties ; une première partie d'analyse des supports graphiques réalisés par les étudiants (croquis, plan, façades, perspectives, rendu de simulation, modèles géométriques) et des captures vidéo des sessions de conception. Ces supports permettent de retracer l'évolution des échanges et des interactions entre les participants et l'outil d'assistance, mais aussi entre les participants eux-mêmes. La deuxième étape consiste à analyser les résultats issus du questionnaire de retour d'expérience et à établir une évaluation de la méthode et de l'outil d'assistance à partir du point de vue des utilisateurs.

1. Les participants

Cette expérimentation s'est déroulée avec seize étudiants de niveau Master 2 de l'ENSA de Nancy ; onze ont un profil d'architecte et quatre ont un profil d'ingénieur (Cf. Tab 9). Trois de ces étudiants suivent une formation en « *Architecture et Culture Constructive* » et treize suivent une formation spécialisée en « *Architecture, Modélisation et Environnement* ». Ces étudiants ont participé au cours de « *Simulation pour l'architecture* » qui permet d'acquérir des connaissances portant sur la maîtrise du comportement de la lumière en milieu architectural et urbain. Ce cours propose une initiation à la simulation de la lumière (naturelle et artificielle) à travers des cas d'étude réalisés sous les logiciels de simulation *Dialux*[®] et *Archiwizard*[®]. Les étudiants sont répartis en cinq binômes et deux trinômes avec des profils mixtes. L'objectif de ce type de répartition est de créer une dynamique conversationnelle qui rend la réflexion cognitive autour du sujet de conception plus visible et intelligible. Les différentes sessions de conception sont filmées pour faciliter le travail de retranscription des échanges, leur analyse et leur interprétation.

Groupe	ID	Initiales	Formation	Profil
G1	1	V.K	AME	A
	13	A.G	AME	A
G2	8	I.T	AME	A
	3	H.T	AME	I
G3	10	R.T	AME	I
	15	C.H	ACC	A
G4	11	P.S	AME	I
	16	I.C	AME	A
G5	5	E.B	ACC	A
	14	T.M	AME	I
G6	4	S.O	ACC	A
	7	M.H	AME	A
G7	9	M-A.B	AME	A
	6	F.G	AME	A
G7	2	W.M	AME	A
	12	E.Z	AME	A

AME Architecture Modélisation et Environnement
ACC Architecture et Culture Constructive
A Architecte
I Ingénieur

Tab 9. Profil des étudiants et répartition des groupes

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué de deux ordinateurs. Un premier intégrant les modules de *DaylightBox* (Cf. Annexe 4) pour l'identification des intentions et la génération des solutions. Le deuxième ordinateur intègre les modules de *DaylightViewer* (Cf. Annexe 5) pour la visualisation et la personnalisation des solutions. Ce type de disposition donne la possibilité aux participants de visualiser d'une manière instantanée les résultats de génération sans compromettre le déroulement des activités de génération (la visualisation des résultats réduit les capacités de calcul de la machine et peut causer un arrêt du processus de génération). L'outil *Day@mbiance* est utilisé pour la déclaration des intentions. *Day@mbiance se présente* sous la forme d'une page web accessible à partir des deux machines (Cf. Fig 127). Les participants disposent de supports de représentation graphiques (le site du projet imprimé sur papier, des crayons) et de modélisation géométriques numériques (modèle géométrique du terrain au format *Autocad*[®], *sketchup*[®] et *Rhinoceros*[®]) leur laissant le libre choix du mode et du format de représentation à utiliser durant les sessions de conception. Les sessions de conception sont filmées avec une caméra (avec une entrée audio) positionnée face aux deux écrans et donnant une vue plongeante sur le plan de travail.



Fig 127. Dispositif d'expérimentation

Ce dispositif offre une vue globale sur la scène qui permet de suivre l'enchaînement de la parole, des actions (dessin, modélisation, manipulation de l'outil) et du regard des étudiants participant à l'expérimentation.

3. Projet de conception

Nous avons proposé aux étudiants un projet de conception d'un espace d'exposition de type construction légère à caractère temporaire dédié à la vie et à l'œuvre de Jean Prouvé. Cet espace aura une surface totale de 300 m² répartie de la manière suivante :

- 2 espaces d'exposition de 100 m² chacun,
- 1 espace d'accueil et de transition de 80 m²,
- 1 espace de service de 20 m².

Le programme définit deux fonctions particulières pour les espaces d'exposition:

- Salle d'exposition N°1 : dédiée à la biographie de Jean Prouvé contenant des supports graphiques retraçant le parcours professionnel de Jean Prouvé (plaquettes et planches biographiques, plans, dessins, perspectives, bornes interactives et maquettes).
- Salle d'exposition N°2 : dédiée aux réalisations de Jean Prouvé (éléments de façades, éléments de structures et meubles).

Le projet conçu devra porter une attention particulière à la lumière naturelle. La lumière naturelle devra permettre d'identifier et de caractériser les différents types d'espaces à concevoir et de mettre en valeur les fonctions qu'ils accueillent. La lumière naturelle doit révéler et mettre en valeur le contenu de l'exposition. Le projet doit être situé sur une parcelle de la pépinière de Nancy entourée par quatre voies piétonnes (Cf. Fig 128). L'implantation du projet n'est soumise à aucune réglementation urbaine la seule contrainte se limite au respect et la prise en compte de la végétation existante.



Fig 128. Site d'implantation du projet

Ce choix de type de projet, de programme et de site permet de réduire les contraintes de conception et de se focaliser sur la prise en compte des ambiances de lumière naturelle. Ces choix offrent la possibilité aux participants de réaliser une esquisse de projet pendant une durée maximale de trois heures. La gestion du temps et la démarche de conception à suivre sont laissées au libre choix des étudiants. Notre intervention se limite à une assistance pour l'utilisation et le paramétrage des dispositifs d'assistance utilisés (paramétrage du processus de génération, activation des simulations, activation des opérateurs de transformation géométrique et résolution des problèmes liés à l'utilisation de l'outil).

Chapitre II. Résultats de l'expérimentation

1. Analyse des sessions de conception

Cette phase a pour but de déterminer le processus suivi par les différents participants durant les sessions de conception. Il s'agit d'identifier les activités des concepteurs et de les situer dans le temps. Cette phase d'analyse a permis d'identifier les principales activités :

- Formulation du problème de conception (*FPC*) : prise en compte du contexte de conception, des contraintes du programme et des propriétés du site d'implantation du projet.
- Implantation du projet (*IP*) : formulation de pistes pour l'implantation du projet en prenant en compte la végétation présente sur le site, les accès possibles et les orientations à prévoir selon les fonctions des espaces à concevoir.
- Formulation d'intentions (*FI*) : formulation d'intention à partir de l'analyse des fonctions du projet à concevoir
- Proposition d'une configuration spatiale (*PC*): proposition d'une première forme du projet de faible niveau de précision. Cette première forme constitue une réponse sommaire aux contraintes de conception (programme, site et intentions).
- Déclaration des intentions d'ambiance de lumière naturelle (*DI*): utilisation de l'outil *Day@mbiance* pour sélectionner des images représentatives des effets de lumière que les étudiants veulent créer dans leurs projets.
- Identification et sélection des types d'effets de lumière à générer (*ISF*): utilisation de l'outil *DaylightBox* pour afficher les résultats de la déclaration des intentions et sélection du type d'effet de lumière naturelle à générer.
- Génération de solution (*GS*) : choix des paramètres et lancement du processus de génération des solutions.
- Prise de connaissance des résultats de génération (*PDC*): parcours, sélection et évaluation des solutions générées. Le résultat de ces évaluations est confronté aux contraintes du projet et aux intentions du concepteur.
- Personnalisation des solutions générées (*PS*) : transformation de solutions sélectionnées pour tester de nouvelles idées et comparer leurs comportements.

- Reconfiguration du projet (*RP*) : transformation du projet en prenant en compte de nouvelles idées et de nouvelles pistes de conception.
- Finalisation de la proposition (*FP*) : préciser et détailler l'esquisse du projet en fixant les dimensions, les proportions, la position des ouvertures, les orientations, l'aménagement intérieur des espaces et les transitions entre les espaces.
- Préparation du rendu (*PR*) : préparation des éléments de rendu
- Débriefing (*D*) : présenter la proposition de projet produite en décrivant le processus de conception suivi et le mode d'interaction avec le dispositif d'assistance utilisé.

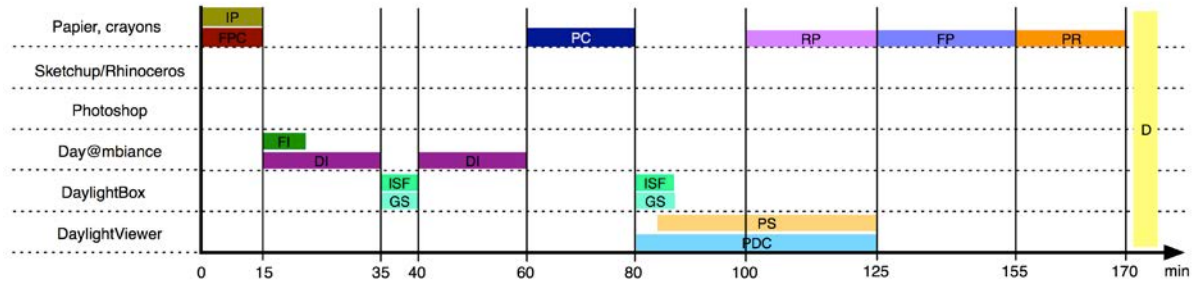
Les groupes d'étudiants participant à l'expérimentation ont proposé des esquisses de projets en tenant compte des consignes du programme. Les esquisses des projets montrent une prise en compte de la lumière naturelle dans le processus de conception du projet. La lumière a été utilisée comme moyen d'expression et de mise en valeur de l'identité des espaces conçus.

Afin de détailler le cheminement des activités qui a permis d'aboutir à ces résultats, nous avons essayé de situer les activités de conception dans le temps et d'identifier les supports utilisés. Les supports utilisés dans le processus d'expérimentation sont :

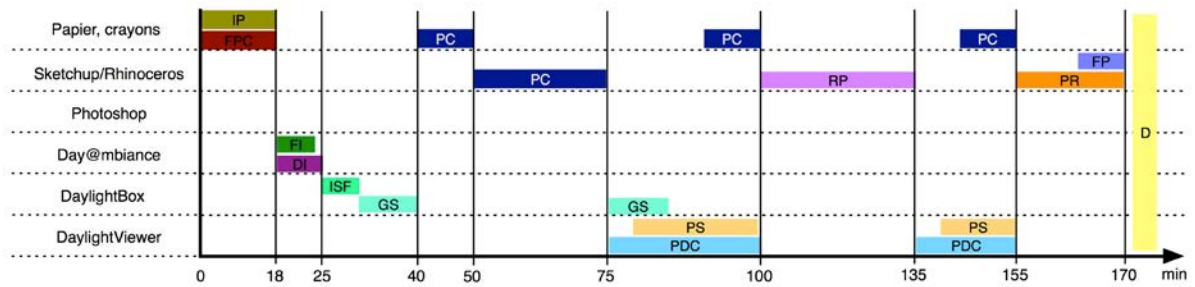
- support de dessin manuel : papier (plan de situation imprimé sur un support A3 et A4 avec une échelle graphique), calque et crayon,
- support de modélisation géométrique 2D et 3D : modèle numérique du plan de situation (*Autocad*[®], *Sketchup*[®] et *Rhinoceros*[®]),
- support de traitement d'image : logiciel de traitement d'image *Photoshop*[®],
- support de déclaration des intentions : l'outil de navigation *Day@mbinace* dans une base de données d'images références,
- support d'identification des intentions et de génération de solution, *DaylightBox*,
- Support de parcours et de personnalisation des solutions générées, *DaylightViewer*.

Ce travail réalisé à partir de l'analyse des captures vidéo des différentes sessions d'expérimentation a été transcrit sous la forme de graphiques permettant de cartographier la démarche de conception de chaque groupe. Ces graphiques retracent le cheminement des activités de conception en fonction du temps tout en déterminant le type de support utilisé (Cf. Fig 129).

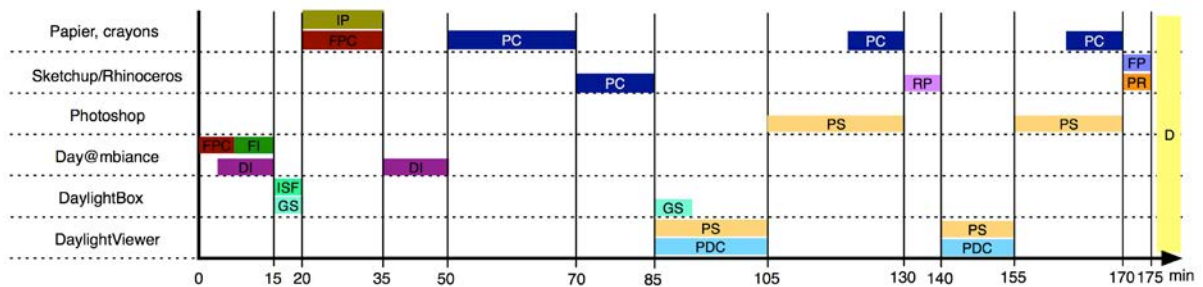
Groupe 1: HI



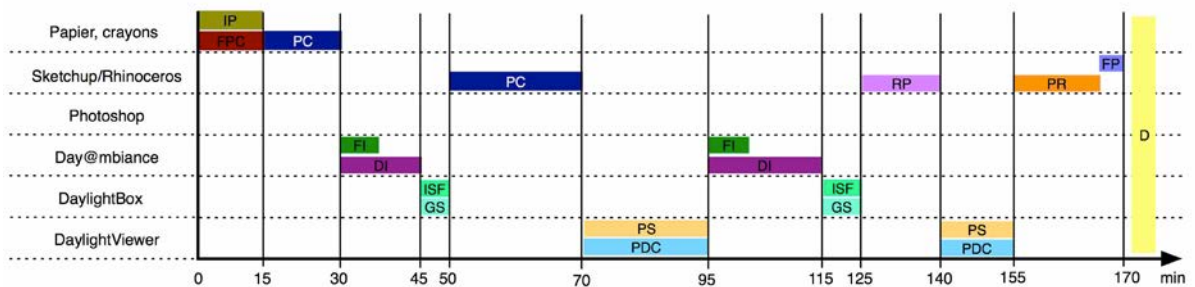
Groupe 2: WFE



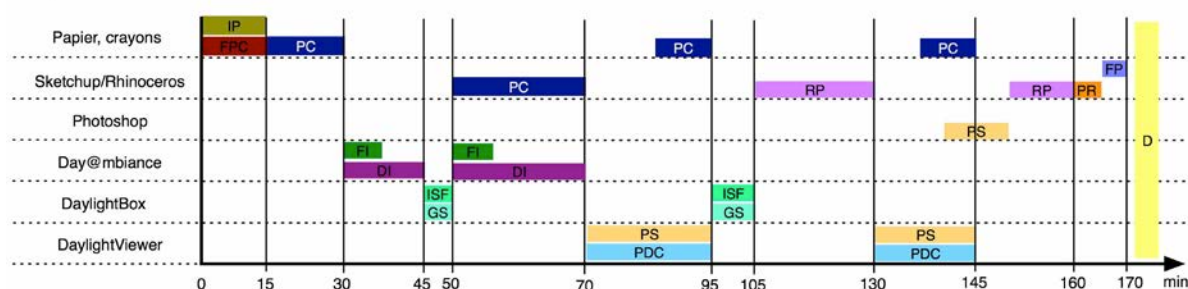
Groupe 3: MM



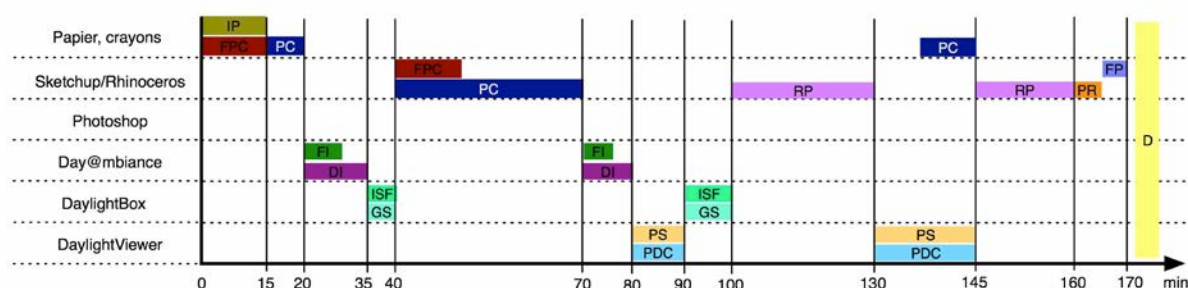
Groupe 4: TS



Groupe 5:AV



Groupe 6:CR



Groupe 7:IEP

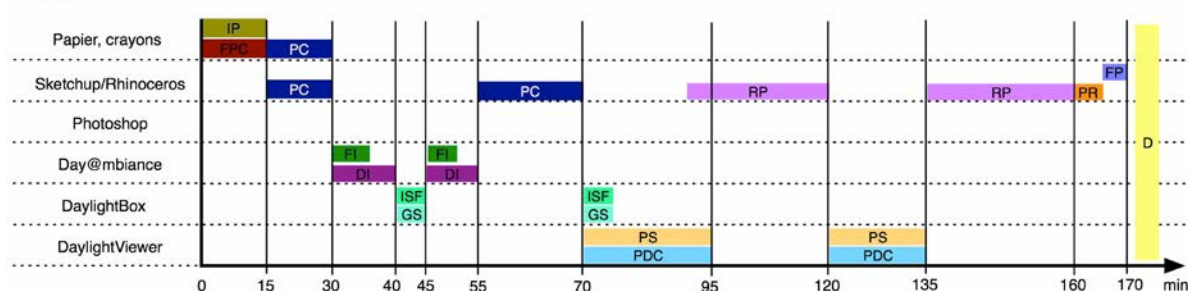


Fig 129. Cheminement des activités de conception des sessions d'expérimentation pour chacun des groupes

L'analyse des retranscriptions des sessions de conception révèle une variation au niveau de l'enchaînement des activités de conception qui caractérisent le début du processus de conception. Cette différence concerne le début de la démarche de conception où on identifie trois types d'enchaînement (Cf. Fig 130).

Démarche 1	Groupe 1-2	FPC	IP	FI	DI	ISF	GS	PC	PS	PDC	RP	FP	PR	D
Démarche 2	Groupe 4-5-6-7	FPC	IP	PC	FI	DI	ISF	GS	PS	PDC	RP	FP	PR	D
Démarche 3	Groupe 3	FPC	FI	DI	ISF	GS	IP	PC	PS	PDC	RP	FP	PR	D

FPC	Formulation du problème de conception	PDC	Prise de connaissance
IP	Implantation du projet	PS	Personnalisation de solutions
FI	Formulation des intentions	RP	Reconfiguration du projet
PC	Proposition d'une configuration spatiale	FP	Finalisation de la proposition
DI	Déclaration des intentions	PR	Préparation du rendu
ISF	Identification et sélection d'effet de lumière	D	Débriefing
GS	Génération de solution		

Fig 130. Démarches de conception des groupes d'étudiants

Le premier type de démarche concerne les groupes 1 et 2 qui ont commencé l'expérimentation par la lecture du programme de conception, l'identification des contraintes de conception (fonctions, terrain, éclairage, orientation) et la proposition d'une première implantation sommaire sur un support papier. A travers l'activité d'implantation, les étudiants proposent des choix de lumière pour chaque espace (« forte lumière », « lumière dirigée »). Le choix de lumière est accompagné d'un choix d'orientation (« plutôt orienté au Nord ») et de taille pour les ouvertures (« des ouvertures larges », « pas trop ouvert »). Ce type d'activité est fortement appuyé par les échanges verbaux et l'utilisation du « croquis d'analyse » constituant une première forme d'externalisation des idées et des intentions de conception (Cf. Fig 131).

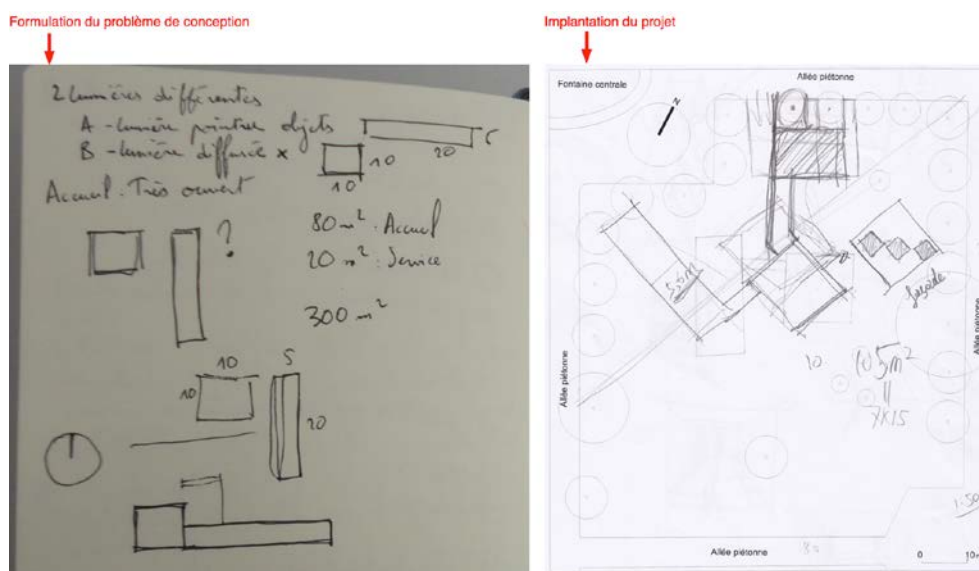


Fig 131. Formulation du problème de conception et implantation du projet (groupe 2)

Ces activités sont suivies de la déclaration des intentions de lumière naturelle en utilisant l'outil *Day@mbiance*. Les enregistrements montrent (à travers les échanges verbaux) une volonté des étudiants à chercher des images représentatives de solutions potentielles aux problèmes de conception identifiés. Les étudiants valident leurs choix d'images par des expressions comme « c'est intéressant »

pour une image qui représente un effet de lumière et une configuration spatiale qui peuvent être utilisés pour l'espace d'exposition des objets et des maquettes. D'autres expressions sont utilisées pour motiver un refus d'image comme « *ça, c'est vachement uniforme, on ne voit pas de lumière* ».

Le deuxième type de démarche concerne les groupes 4, 5, 6 et 7 où les étudiants commencent le processus d'expérimentation par la formulation du problème de conception de la même manière que les groupes 1 et 2 enchainant ensuite une activité de proposition de configuration spatiale pour le projet. Cette activité consiste à donner une première forme et des proportions aux différents espaces du projet. Cette activité fait appel au « *croquis d'étude* » comme support principal de représentation des premières esquisses du projet. Le groupe 7 a associé le mode de représentation à main levée à la modélisation tridimensionnelle avec le logiciel *Sketchup*[®]. Ce type d'association permet d'avoir une double lecture de la proposition : une première lecture bidimensionnelle et globale sur l'ensemble des espaces conçus et une lecture tridimensionnelle orientée des volumes.

Le troisième schéma de conception, suivi par le groupe 3, commence directement par une activité de formulation du problème de conception suite à la lecture du programme du projet en focalisant sur les besoins en éclairage naturel. Cette activité se poursuit par la formulation et la déclaration d'intentions de lumière naturelle à créer à l'intérieur des espaces en utilisant *Day@mbiance*. L'activité d'implantation du projet arrive en troisième lieu accompagnée d'une formulation plus complète du problème de conception intégrant des contraintes fonctionnelles (accessibilité).

L'enchaînement du reste des activités est le même pour l'ensemble des groupes. Suite à la déclaration des intentions, les étudiants utilisent le dispositif logiciel *DaylightBox* pour identifier les types d'effets de lumières issues de la déclaration des intentions et choisir les paramètres de génération. Cette étape se conclut par le lancement du processus de génération des solutions. Le processus de génération demande un temps de calcul qui a été paramétré pour durer en moyenne de 30 minutes. Pendant ce temps (intervalle entre 45 et 70 min après le début de l'expérimentation) les étudiants commencent à formuler une première proposition de configuration spatiale. Cette activité fait appel à deux types de support : les outils de dessin manuel et les outils de modélisation numérique. La majorité des groupes ont associé ces deux modes de représentation sauf le groupe 1 qui a finalisé le projet en utilisant exclusivement le dessin manuel (formulation et rendu) (Cf. Fig 132).

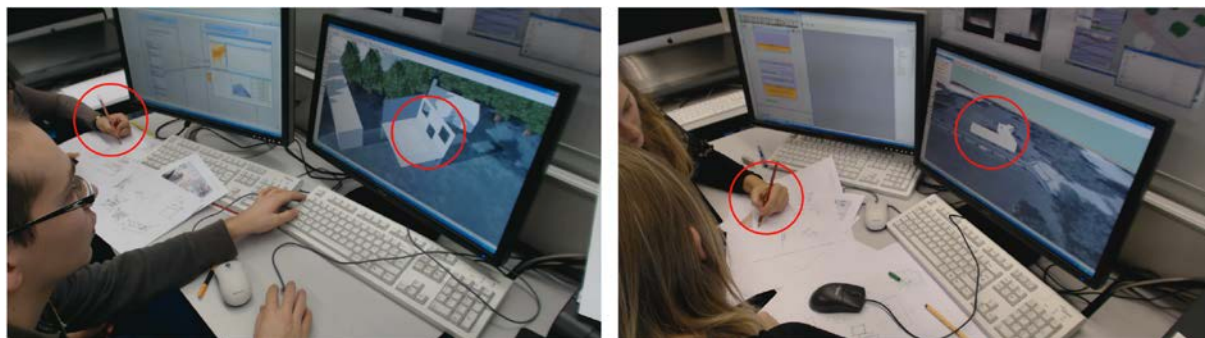


Fig 132. Proposition d'une configuration spatiale pour le projet (groupe 2 et 5)

Cette activité a donné lieu à une première réponse au programme intégrant des hypothèses et des suggestions de configurations d'ouvertures et de traitement de lumière naturelle. Les étudiants suspendent cette activité pour prendre connaissance des résultats de génération des solutions. La navigation et le parcours des solutions générées sont accompagnés d'activités de sélection et d'évaluation (qualitative et quantitative). Les étudiants choisissent les solutions qui les interpellent par leur configuration (taux d'ouverture, taille des ouvertures, disposition des ouvertures, nombre d'ouvertures) directement visible à partir de la navigation (Cf. Fig 133). L'intérêt pour une solution est identifié à partir d'expression comme *« ça c'est petit, ça concentre la lumière, c'est ce qu'on a vu tout à l'heure »* ou *« c'est un effet prison »* (en parlant d'une configuration qui propose une série d'ouvertures fines et verticales).

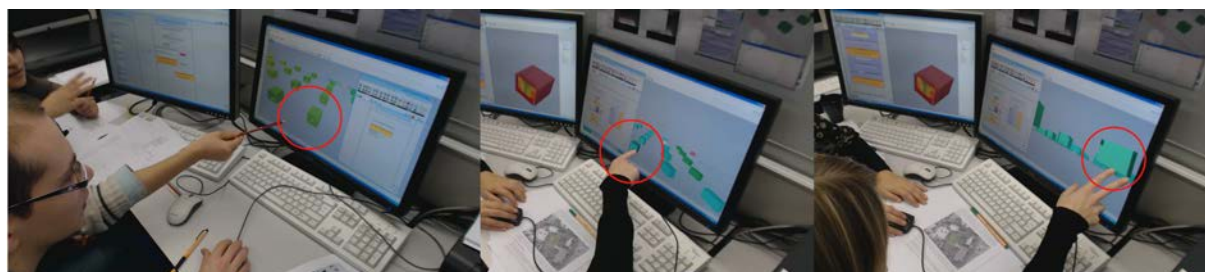


Fig 133. Parcours et sélection solutions (groupe 2 et 5)

Suite à ce premier parcours, les groupes d'expérimentation ont utilisé les fonctions d'évaluation photo-réalistes afin de visualiser les types d'effet de lumière créés par les solutions générées ainsi que par les solutions personnalisées. Le nom donné aux résultats de simulation (fichier image) indique le numéro et type de solution (générée ou personnalisée) permettant aux étudiants de les repérer et d'identifier les solutions modifiées. Le groupe 7 a utilisé la fonction d'évaluation pour vérifier la variation de l'effet de lumière produit dans le temps et sous des conditions d'éclairage différentes (Cf. Fig 134).

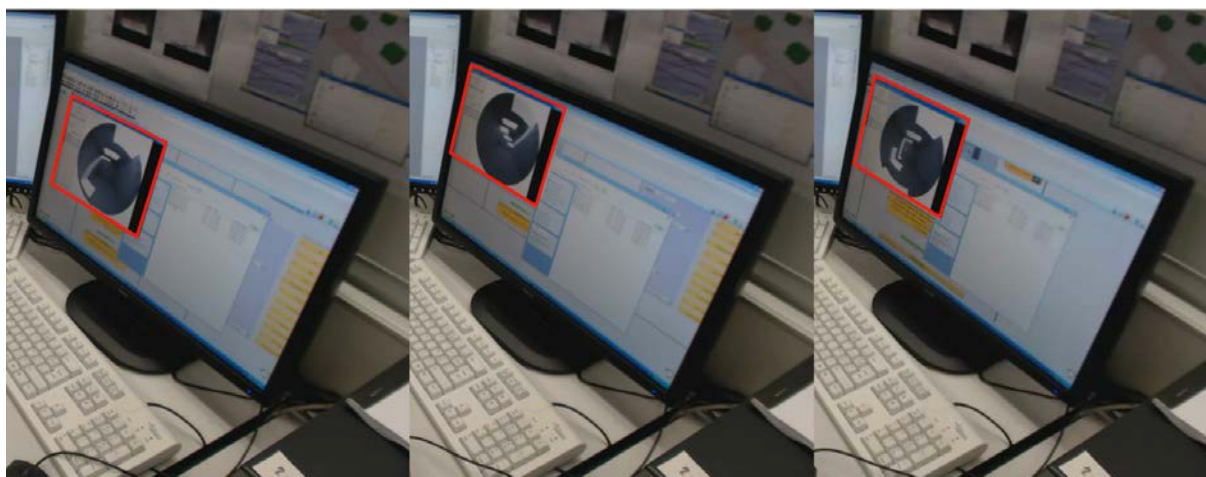


Fig 134. Simulation de la lumière naturelle pour trois horaires différents (groupe 7)

Les évaluations ont donné lieu à des activités de modification et de personnalisation des solutions générées. Ces activités sont motivées par la volonté d'affiner certaines propriétés des solutions générées (changer d'orientation, changer de matériaux, augmenter le nombre d'ouvertures, modifier la disposition des ouvertures) ou de tester la validité de nouvelles configurations proposées par les étudiants eux-mêmes (Cf. Fig 135).



Fig 135. Personnalisation des solutions générées (groupe 2, 6 et 7)

Les groupes 3 et 5 ont utilisé le logiciel de traitement d'image *Photoshop*® pour combiner les résultats de simulation de plusieurs solutions générées et personnalisées (fusion d'images de rendus photo-réalistes) générant de nouvelles configurations d'ouverture et de nouveaux effets de lumière naturelle (Cf. Fig 136). Ce choix de technique a permis à ces groupes de dépasser les limites de l'outil d'assistance en simulant l'effet de lumière naturelle produit à partir d'une série d'ouvertures positionnées sur plusieurs faces.

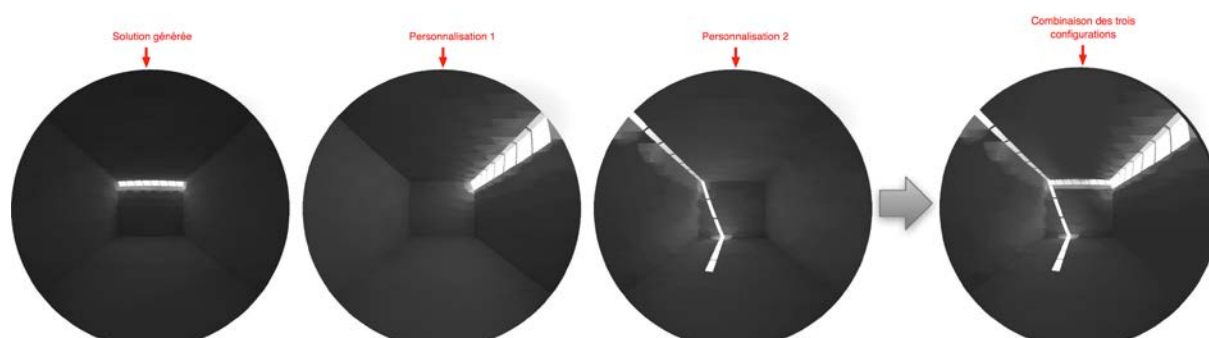


Fig 136. Combinaison des effets générés (groupe 3)

À partir de ces évaluations, les étudiants ont pu constituer une collection de solutions générant plusieurs effets de lumière qu'ils ont implémentés par analogie dans leurs propositions de projets. Cette activité d'implémentation s'est matérialisée par l'interprétation des configurations générées pour les appliquer aux projets. Les étudiants ont pris en considération les propriétés caractéristiques des configurations générées comme les proportions des ouvertures, leur orientation, leur position, leur nombre, la capacité de réflexion des surfaces et le type de vitrage pour reconfigurer leurs premières propositions du projet. Ce travail de reconfiguration a été réalisé en utilisant les outils de dessin manuel et les outils numériques de modélisation géométrique (Cf. Fig 137).

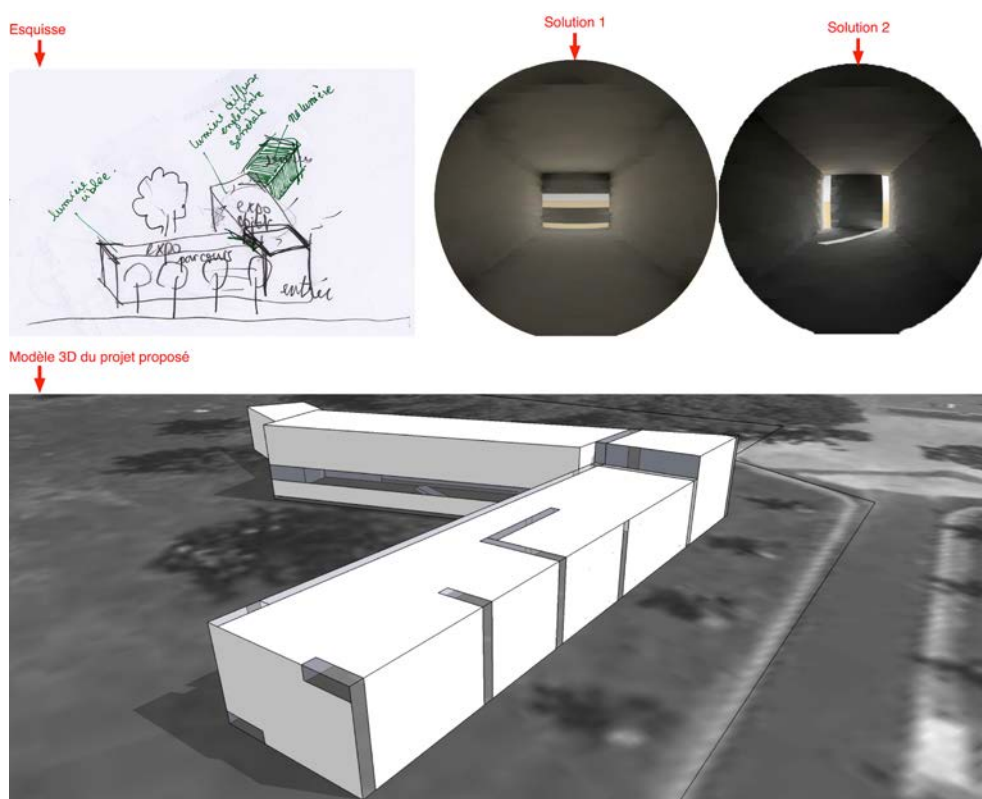


Fig 137. Implémentation des résultats de génération et de personnalisation des solutions dans le projet

Suite aux activités de reconfiguration et de finalisation de la proposition, les étudiants ont préparé les éléments de rendu en essayant de mettre l'accent sur la continuité entre leur projet et la lumière

naturelle. Le groupe 1 a utilisé la technique du dessin au crayon pour essayer d'imaginer (à partir des résultats des simulations réalisées sur les solutions générées) le type d'éclairage naturel qu'il peut obtenir dans sa proposition. Les étudiants des groupes 2, 4, 5 et 6 ont utilisé les fonctions de visualisation et de paramétrage des ombres du logiciel de modélisation *sketchup*[®] pour valider leurs choix de configuration d'ouverture et de lumière. Ils ont essayé de proposer un aménagement sommaire (supports d'affichage, volumes représentant les objets à exposer) et de visualiser le résultat d'éclairage obtenu. Le groupe 7 a utilisé les fonctions de simulation de la lumière naturelle intégrés à *Rhinoceros*[®] (à travers son plug-in Diva-for-Rhino) pour réaliser des simulations photo-réalistes et valider la configuration proposée. Ce choix de méthode de validation est expliqué par la connaissance et la maîtrise de ce plug-in par un des membres du groupe.

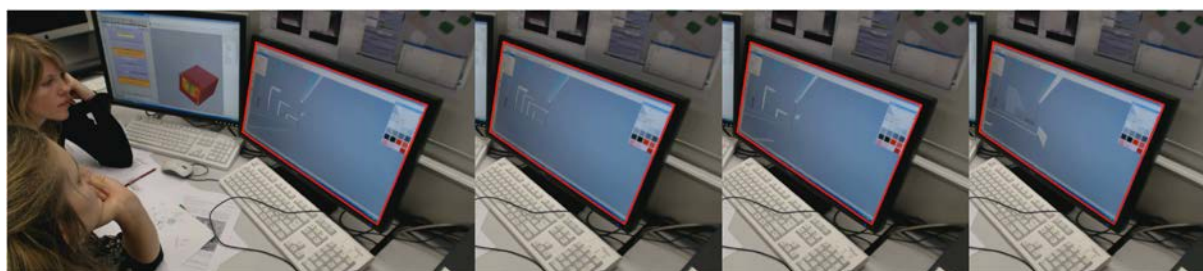


Fig 138. Validation finale de la proposition en utilisant les fonctions de simulation des ombres sous *Sketchup*[®] (groupe 5)

2. Analyse des résultats du questionnaire

2.1 La déclaration et l'identification des intentions

Les résultats issus du questionnaire révèlent le manque de précision et l'incertitude qui caractérisent l'activité de création et de contrôle des ambiances de lumière naturelle durant les phases conceptuelles du projet. La majorité des étudiants questionnés estiment (avant l'utilisation de l'outil d'assistance *DaylightGen*) qu'ils ont le sentiment de peu ou moyennement maîtriser le comportement de la lumière naturelle durant les phases amont du projet. Ils expliquent cette situation par le manque de connaissances et le manque d'expérience. La majorité de ces étudiants déclarent avoir moyennement ou peu d'idées pour décrire le type d'effet de lumière naturelle à créer pour le projet. D'après les explications des étudiants, ce manque de maîtrise et de connaissance crée un décalage entre les intentions et les réponses architecturales proposées.

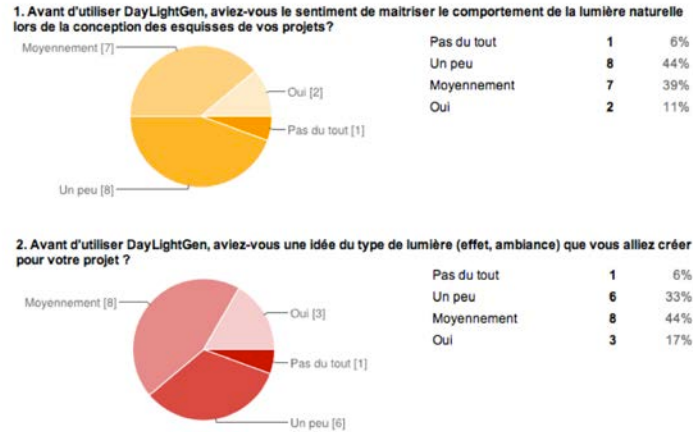


Fig 139. Niveau de maîtrise du comportement de la lumière naturelle durant les phases conceptuelles du projet

Concernant la déclaration des intentions, la majorité des participants à l'expérimentation (78%) affirment que l'utilisation de la mosaïque d'images références, proposée par l'outil de *Day@mbiance*, est un bon moyen de recherche et de découverte de nouvelles idées d'ambiance de lumière naturelle. Ils estiment que les images références permettent de donner une forme à leurs idées. Ce constat est le même pour l'identification des intentions où 87% des étudiants déclarent que les types effet identifiés par l'outil correspondent à leurs intentions. Ce résultat permet de confirmer la pertinence de la caractérisation des images par des mots clés décrivant les types d'effets de lumière.

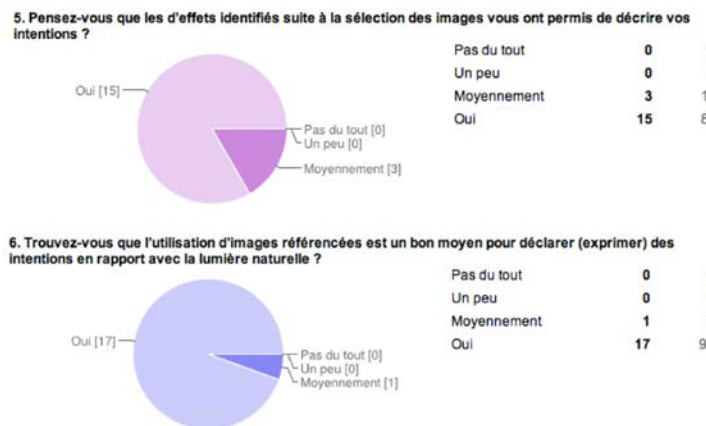


Fig 140. La pertinence de l'utilisation des images pour la déclaration et l'identification des intentions

2.2 La génération de solutions

Les résultats du questionnaire montrent que les avis sont très partagés concernant l'influence du choix des paramètres, exploités par le moteur génératif, sur les choix de conception des étudiants. En effet, certains groupes ont déjà arrêté des choix de conception avant le moment du paramétrage du module génératif. Cette décision se matérialise par la fixation de la valeur de certains paramètres comme l'orientation, la disposition des ouvertures ou bien le type de parois correspondant à des choix de conception définis pendant la formulation du problème de conception ou la formulation des intentions.

En revanche, d'autres groupes ont laissé la possibilité au module de génération d'agir sur l'ensemble des paramètres du modèle géométrique.

La navigation et le parcours dans la collection de solutions générées semblent avoir de l'influence sur les choix de conception des étudiants. En effet plus de la moitié des participants (56%) affirment que la navigation dans la grille de solutions a influencé leurs choix de conception (Cf. Fig 141). Les étudiants expliquent que ces solutions permettent, en premier lieu, de vérifier la validité des pistes de conception qu'ils ont développées au début du processus de conception et de chercher ensuite de nouvelles solutions qu'ils n'ont pas encore imaginées. Pour 39% et 50% des étudiants, les solutions générées sont respectivement soit parfaitement ou moyennement représentatives de leurs intentions. Ce niveau de représentation dépend de beaucoup de facteurs comme le nombre de paramètres intégrés au processus de génération, la durée du processus, l'effet de similitude des solutions proposées ou les limites du modèle géométrique (ouverture sur une seule face, ouvertures multiples mais de même configuration).

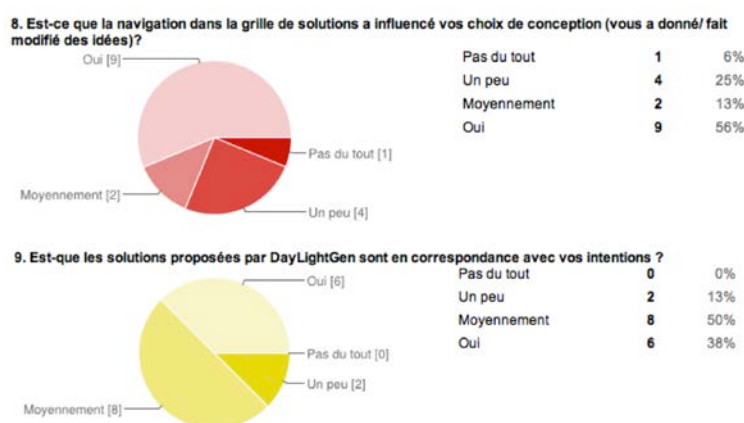


Fig 141. Influence de la navigation dans la grille de solutions sur les choix des concepteurs et niveau de correspondance des solutions aux intentions des concepteurs

Les solutions générées ont pour 50% des étudiants permis d'orienter leurs choix de conception (Cf. Fig 142). Cette orientation des choix se fait selon deux procédés. Le premier consiste à explorer de nouvelles pistes de conception auxquelles ils n'ont pas pensé. L'évaluation de la capacité d'exploration est assez partagée, car seulement 33% des participants estiment avoir pu découvrir de nouvelles pistes de conception à partir des solutions générées. Le reste des étudiants (39%) déclarent que les solutions générées ont permis d'explorer « *un peu* » de nouvelles pistes de conception. Le deuxième procédé d'orientation des choix de conception consiste à corriger et à valider les intentions et les propositions de configuration prédéfinies durant les premières étapes du processus (formulation du problème de conception, proposition de configuration). Ce procédé se matérialise par la recherche dans les solutions générées de similitudes avec les idées avancées au début du processus.

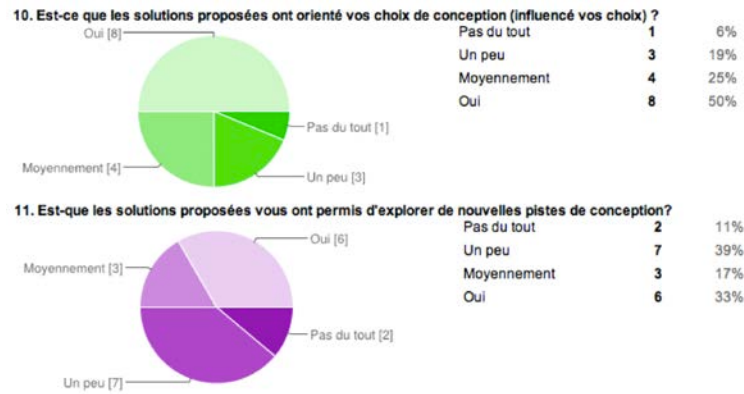


Fig 142. Capacité des solutions à orienter les choix de conception et à explorer de nouvelles pistes de conception

Les étudiants ont utilisé deux modes d'évaluation afin de prendre connaissance du potentiel des solutions générées. Un premier mode d'évaluation visuel qui permet de déterminer la capacité des solutions générées à répondre aux attentes et aux intentions des concepteurs. Ce mode, utilisé par 10 participants, fait appel aux représentations géométriques des solutions proposées et à des informations qui les accompagnent (information visible au dessus du modèle géométrique décrivant les types de matériaux utilisés, les surfaces d'ouverture, l'orientation) (Cf. Fig 143). Les étudiants sont interpellés par les configurations présentant des formes, des dispositions ou des positions d'ouverture intéressantes. Le deuxième mode d'évaluation, plus approfondi, fait appel aux fonctions de simulation photo-réaliste intégrées à l'outil d'assistance. Ce mode d'évaluation est utilisé par l'ensemble des groupes, il permet d'avoir une lecture directe de l'effet de lumière produit par la configuration spatiale choisie sous différentes conditions d'éclairage. Les résultats issus des simulations photo-réalistes ont eu une influence sur les décisions et les choix de conception des étudiants. Ce constat s'explique par l'effet immédiat que produit ce type d'évaluation visuelle et qualitative chez les étudiants.

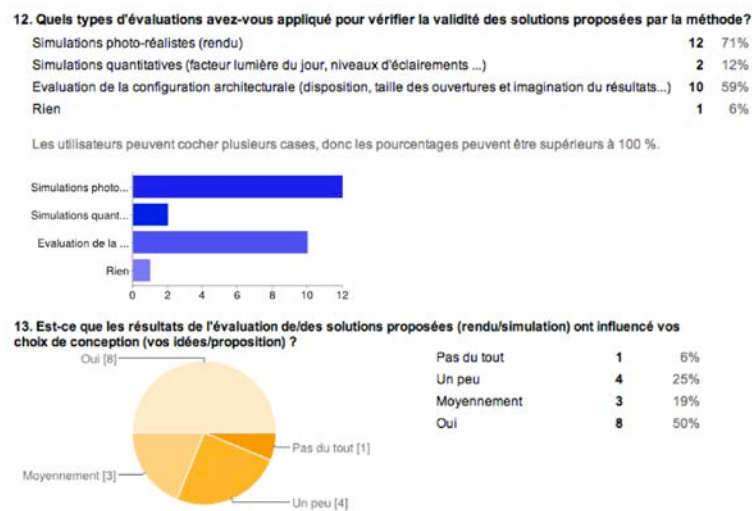


Fig 143. Types d'évaluation et leur influence sur les choix de conception

2.3 Personnalisation des solutions

La fonction de personnalisation des solutions est qualifiée comme étant très utile et potentiellement utile par l'ensemble des participants à l'expérimentation. D'après les étudiants, cette fonction a permis de modifier rapidement les propriétés des configurations générées pour les adapter à leurs attentes ou bien pour tester la validité de nouvelles idées. La majorité des participants à l'expérimentation (69 %) considèrent que la fonction de personnalisation des solutions et la fonction de simulation photo-réaliste permettent d'explorer de nouvelles pistes de conception (Cf. Fig 144). Un des groupes d'étudiants met l'accent sur la possibilité de comparer les effets produits par plusieurs configurations pour ensuite les implémenter dans le projet.

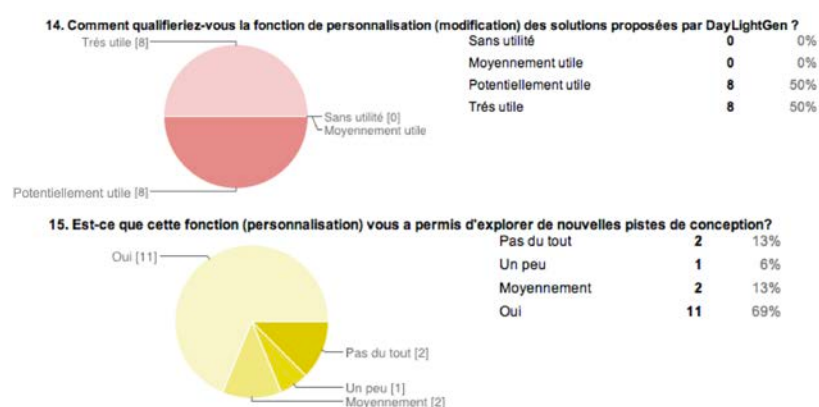
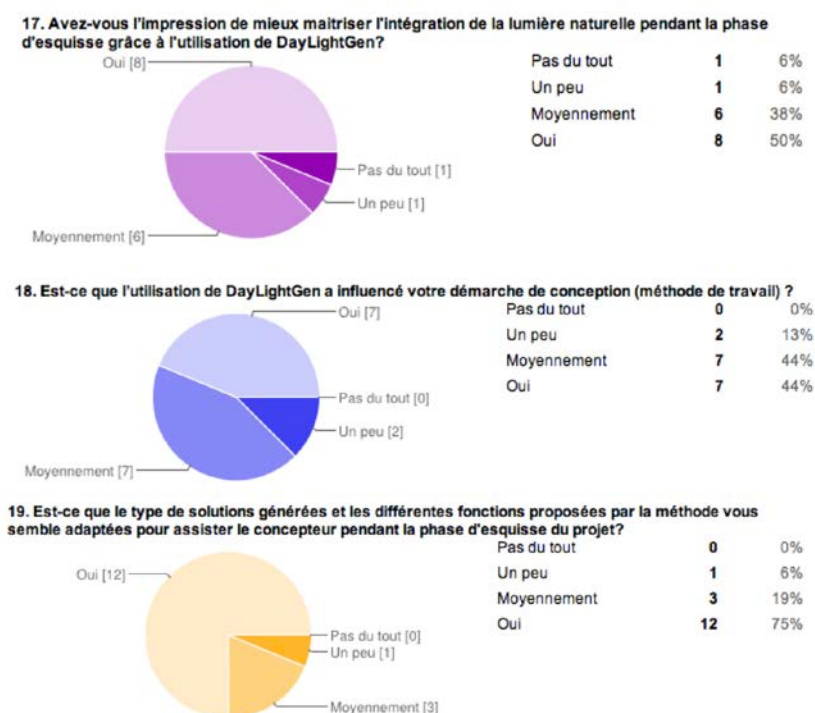


Fig 144. Evaluation de la fonction de personnalisation des solutions et de sa capacité d'exploration de nouvelles pistes de conception

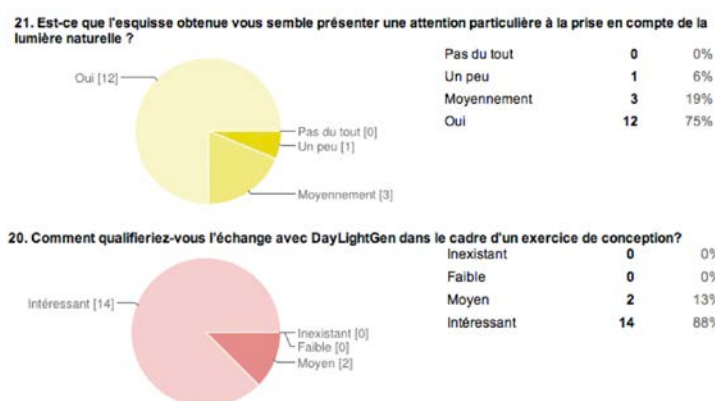
2.4 Evaluation de l'utilisation de l'outil d'assistance

D'après les résultats du questionnaire, l'outil *DaylightGen* a apporté, pour la majorité des participants à l'expérimentation, un réel niveau de maîtrise de la lumière naturelle durant les phases conceptuelles du projet (Cf. Fig 145). Cette maîtrise se matérialise à travers la possibilité de prévoir le type d'effet de lumière et de valider certains choix avant la finalisation du projet. La continuité entre lumière naturelle et projet est présente par l'intégration des paramètres régissant la variation du comportement lumineux des espaces durant les phases de formulation du projet.

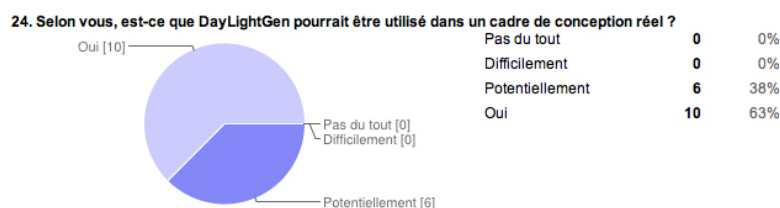
Fig 145. Evaluation de l'influence de *DaylightGen* sur la démarche de conception et de son potentiel d'assistance

Selon 44% des étudiants, l'utilisation de cet outil a changé leur démarche de conception dans la mesure où ils ont été amenés à une réflexion précise et complète sur la lumière naturelle durant les premières phases de formalisation de leurs projets. D'autres participants (44%) considèrent que cet outil n'a pas changé leur démarche de conception, mais qu'il a permis d'améliorer et d'optimiser la qualité des résultats obtenus. *DaylightGen* est considéré par 75% des participants, comme adapté à une fonction d'assistance pendant les phases conceptuelles du projet en offrant un dialogue intéressant avec les utilisateurs.

Dans ce contexte, 88% des étudiants qualifient le mode d'échange offert par cet outil comme étant intéressant en mettant l'accent sur la différence avec les autres types d'échanges proposés par les outils d'assistance qualifiés de « classiques » (Cf. Fig 146). Ils insistent sur la capacité de l'outil à prendre en compte les intentions du concepteur et à proposer des réponses tout en laissant une marge de manœuvre assez large. Cette marge de manœuvre se matérialise par la possibilité d'agir et d'intervenir sur les réponses proposées en les personnalisant et en les faisant évoluer pour finalement les intégrer au projet. Ces fonctions ont permis d'aboutir à des esquisses de projet qui pour 75% des participants présentent une attention particulière et une intégration de la lumière naturelle.

Fig 146. Evaluation des résultats issus de l'utilisation de *DaylightGen* et de son potentiel d'échange avec le concepteur

Concernant l'utilité et le potentiel d'utilisation du prototype d'outil *DaylightGen* dans un cadre de conception réel, les participants estiment qu'il est potentiellement utile, mais qu'il nécessite quelques améliorations portant particulièrement sur l'interface et sur le modèle paramétrique utilisé. Les étudiants ont mis en évidence des problèmes liés à l'utilisation de l'outil et le besoin de mettre en place une interface plus adaptée à un public de non-initiés aux environnements logiciels *Grasshopper*[®] et *Rhinoceros*[®] (Cf. Fig 147). Ce résultat était prévisible, puisque cette problématique liée à l'utilisabilité de l'outil ne faisait pas partie de notre recherche. Les participants ont révélé les limites du modèle paramétrique qui n'offre pas la possibilité de positionner des ouvertures sur plusieurs faces et ne permet pas de créer des ouvertures multiples de formes différentes. Comme perspectives de développement de cet outil, les étudiants proposent la possibilité d'intégrer leurs propres configurations spatiales à la place du modèle paramétrique actuel afin de pouvoir générer des solutions plus contextualisées prenant en compte la forme de leurs propositions.

Fig 147. Evaluation de la capacité d'adaptation de *DaylightGen* à un cadre de conception réel

3. Synthèse

Nous avons présenté dans ce chapitre le protocole suivi pour expérimenter le potentiel d'assistance à la conception de l'outil *DaylightGen* dans un cadre réel de conception. Nous avons ainsi déterminé le profil des participants à cette étude, le type de dispositif mis en place et le contexte de conception. Les résultats de cette expérimentation ont été analysés afin de déterminer le mode de participation de l'outil proposé aux activités de conception et leurs répercussions sur le projet lui-même. Ce travail d'analyse a fait appel aux enregistrements vidéo des sessions d'expérimentation ainsi qu'aux réponses issues du questionnaire de retour d'expérience envoyé aux étudiants.

Ce travail d'analyse permet de valider nos hypothèses de départ. L'outil *DaylightGen* permet :

- une prise en compte rapide et précoce des intentions d'ambiance lumineuses,
- une aide à la formalisation des intentions à travers la sélection d'images références,
- une aide à la matérialisation des intentions à travers la proposition de solutions architecturales représentatives des intentions du concepteur,
- la prise en compte du contexte et des contraintes de conception pendant la phase de génération des solutions,
- une possibilité d'échange avec l'utilisateur en proposant des fonctions itératives de définition de configuration, d'évaluation du comportement lumineux et de prise de connaissance,
- une simplification des activités d'intégration de la lumière naturelle durant les phases conceptuelles du projet à travers l'intégration de données et d'information multiples et incertaines.

Ce travail d'expérimentation a permis de révéler deux limites majeures de l'outil proposé. La première limite concerne l'interface d'utilisation de l'outil considérée comme complexe et non adaptée à des utilisateurs constitués majoritairement de non-initiés aux logiciels *Grasshopper*[®] et *Rhinoceros*[®]. La deuxième limite porte sur le modèle paramétrique qui offre des possibilités de configuration spatiales réduites.

Conclusion générale

Mon travail de thèse s'intéresse à la question de la prise en compte et l'intégration des effets de la lumière naturelle durant les phases initiales du processus de conception architecturale. Ce travail de recherche a permis de mettre en place d'une méthode et un prototype d'outil d'assistance qui offre la possibilité de générer des réponses architecturales en partant d'une description qualitative des intentions d'éclairage naturel. Ces solutions constituent des propositions de matérialisation des intentions sous la forme de configuration spatiale générant un type d'effet de lumière naturelle particulier. Le concepteur considère ces propositions comme des références contextualisées qu'il peut exploiter par analogie dans son projet.

Nous avons commencé ce travail de recherche par l'identification et la caractérisation des besoins des concepteurs et particulièrement ceux des jeunes concepteurs, sans expérience professionnelle en terme d'assistance à la maîtrise des apports lumineux. Ce travail d'identification a commencé par une première phase de caractérisation du processus de conception lui même. Cette caractérisation a donné lieu à un ensemble de phases de conception matérialisées par des activités. Ce travail a permis de décrire, d'une manière précise, le mode de participation et de prise en compte de la lumière naturelle durant les différentes phases du processus de conception architectural et particulièrement durant les phases conceptuelles.

Ce travail de caractérisation du besoin d'assistance s'est poursuivi par une analyse des différentes méthodes d'assistance à la conception. D'un côté, cette analyse a révélé les limites des méthodes existantes à prendre en compte des phénomènes physiques complexes comme la lumière naturelle durant des phases caractérisées par l'incertitude et le manque d'informations précises. D'un autre côté, ces résultats révèlent le potentiel qu'offre l'association de ces méthodes et de ces outils pour proposer une aide à la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases conceptuelles.

Ainsi, nous avons pu établir que l'utilisation des intentions d'ambiance de lumière naturelle peut être considérée comme l'information principale à utiliser par une méthode et un outil d'assistance à la conception pendant les phases préliminaires du projet. En effet, les intentions constituent les seules informations disponibles à ce moment précis du processus de conception. Ce constat est issu d'analyses d'écrits et de dessins d'architectes, mais aussi d'une enquête que nous avons réalisée avec des jeunes concepteurs.

À partir de ce constat, nous avons essayé de définir une méthode d'assistance à la conception qui prenne comme référence les intentions du concepteur, en termes d'effet de lumière naturelle, dans le but de proposer des solutions architecturales pertinentes.

La mise en place de cette méthode a commencé par l'identification et la classification des types d'effet de lumière que l'on peut rencontrer dans un milieu architectural. Ce travail d'identification est le résultat d'un croisement d'un ensemble de travaux de recherche. Nous avons ensuite caractérisé ces types d'effet de lumière selon trois niveaux. Le premier niveau de caractérisation donne une description verbale de l'effet produit et de son interaction avec les surfaces, les matériaux et les objets de l'espace intérieur ont été sélectionnés. Le deuxième niveau de description est visuel : un ensemble d'images issues de projets d'architecture représentant les types d'effet de lumière. Le troisième niveau de caractérisation porte sur la dimension physique de la lumière naturelle. Cette dimension est décrite en attribuant des valeurs aux paramètres qui déterminent le comportement lumineux d'un espace.

À partir de ces informations, nous avons pu définir les phases et identifier les acteurs participants au processus de la méthode d'assistance que nous avons proposée. Cette méthode commence par une phase de déclaration des intentions en utilisant comme support des images représentatives des types d'effet de lumière naturelle. Les intentions sont ensuite identifiées et caractérisées afin de pouvoir générer des solutions. Ce processus se poursuit par une phase de prise de connaissance pendant laquelle le concepteur évalue la validité des solutions proposées et leur capacité à vérifier ses intentions. Ce processus se termine par la phase de personnalisation où le concepteur peut modifier les propriétés des solutions générées ou tester de nouvelles configurations.

Ce processus a été ensuite implémenté dans un outil faisant appel à trois composants logiciels. Le premier composant *Day@mbiance*, est un outil de navigation dans une base d'images références qui permet à l'utilisateur de sélectionner, d'une manière interactive, les images qui correspondent à ses intentions. Les images intégrées dans cette base sont issues de la caractérisation visuelle des types d'effet de lumière naturelle. Le deuxième composant *DaylightBox* identifie et caractérise les intentions du concepteur issues de la navigation dans la base d'images pour lancer le processus de génération des solutions. Ces solutions sont visualisées en utilisant le composant *DaylightViewer* qui offre la possibilité de parcourir et de sélectionner celles qui apportent un intérêt pour le concepteur. Ce composant permet aussi d'évaluer le comportement de l'effet lumineux généré par ces solutions et de modifier la configuration architecturale.

Résultats

Mon travail de thèse a permis d'aborder d'une manière globale la question de l'assistance à la conception architecturale tout au long du processus de création architecturale. Cette recherche s'est

focalisée sur la question de l'intégration des intentions de lumière naturelle pendant les phases préliminaires de conception du projet. Elle a identifié les facteurs qui déterminent le mode d'apport et de propagation de la lumière naturelle dans un espace architectural. Cette recherche s'est concrétisée par la proposition d'une méthode et d'un outil d'accompagnement du processus conceptuel qui prennent en compte les caractéristiques des phases préliminaires du projet ainsi que les contraintes et les attentes des concepteurs à cette étape du processus créatif. Ce dispositif propose une assistance en amont, évolutive et itérative dans l'objectif d'améliorer la qualité de la production architecturale.

Mon travail de recherche a permis de :

- construire une connaissance autour de la lumière naturelle (aspects quantitatifs et qualitatifs) et son rapport avec l'architecture.
- montrer la variation de la complexité qui entoure la question de l'intégration, la prise en compte et la maîtrise du comportement de la lumière naturelle pendant les différentes étapes du processus de création architecturale.
- mettre en évidence le besoin d'assistance à la formalisation et à l'intégration des intentions d'ambiance de la lumière naturelle durant les phases conceptuelles du projet d'architecture (phases préliminaires).
- construire une connaissance autour des différentes familles de méthodes et d'outils d'assistance à la conception existantes et leurs degrés d'intégration et participation dans le processus de conception.
- structurer une méthode d'assistance à la formalisation et à l'intégration des intentions qualitatives de lumière naturelle appliquée aux phases amont du processus de conception architecturale.
- implémenter cette méthode dans un prototype d'outil et d'évaluer son apport et son adaptation aux besoins des utilisateurs.

Limites de la recherche

Les phases d'implémentation et d'expérimentation ont révélé un ensemble de limites concernant la définition et la caractérisation des types d'effet de lumière. Le nombre de types d'effet est très faible ne permettant pas de définir une description précise des intentions des concepteurs. Ce manque de précision est associé à la difficulté de mise en place des fonctions d'optimisation qui demande un long travail d'analyse et d'interprétation empirique de données quantitatives et qualitatives. Nous notons également le nombre limité de fonction et de configuration qu'offre le modèle paramétrique utilisé pour les activités de génération.

Perspectives de recherche

Ces connaissances ouvrent des perspectives de recherche qui visent particulièrement à enrichir les fonctionnalités offertes par la méthode et le prototype d'outil d'assistance que nous avons proposés. En effet, les résultats des expérimentations ont mis en évidence des besoins qui peuvent faire l'objet de futurs travaux de recherche. Ces perspectives portent particulièrement sur le besoin de prendre en compte d'une manière précise la diversité et la richesse qui caractérisent les intentions du concepteur en abordant la notion de patron de conception. Cette perspective a été déjà initiée dans le cadre du travail de recherche élaboré par Isabelle Cervantès (Cervantès, 2012) qui a proposé la notion de patron d'ambiance pour définir et caractériser les intentions du concepteur. Cette notion associe le type d'effet de lumière, le type de dispositif à utiliser et le type d'usage de l'espace à concevoir pour l'identification et la définition des fonctions de caractérisation des intentions du concepteur.

D'autres perspectives portent sur la possibilité d'intégrer différentes contraintes d'éco-conception en proposant une méthode d'assistance qui associe les contraintes de lumière naturelle avec des contraintes thermiques et environnementales. Le but est de proposer une plate-forme d'assistance unique qui permet au concepteur d'intégrer simultanément ces contraintes. Enfin, cette recherche ouvre des perspectives de développement des potentialités du modèle paramétrique, utilisé pour la génération de solution, ainsi que la définition de nouveaux modes d'échange et plus généralement de dialogue entre le concepteur et les outils d'assistance à conception en phases préliminaires du projet.

Références

Bibliographie

AFNOR, 1993. *Information et documentation - Principes généraux pour l'indexation des documents*. octobre 1993.

ALEKAN, Henri, 1991. *Lumières de la nuit*. In : *L'architecture d'aujourd'hui*. 1991. n° 275.

ARCHITECTURE ET CLIMAT, 2012. Site Energie+. In : [en ligne]. juillet 2012. [Consulté le 13 août 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.energieplus-lesite.be/>.

ATTIA, Shady, 2012. *Computational Optimisation for Zero Energy Building Design: Interviews with Twenty Eight International Experts*. International Energy Agency (IEA) Task 40: Towards Net Zero Energy Buildings Subtask B.

BAKER, Nick Vashon et STEEMERS, K. A., 2002. *Daylight design of buildings*. London : James & James. ISBN 9781873936887.

BALTANAS, José, 2005. *Le Corbusier, parcours*. Parenthèses. ISBN 2863641352.

BARDIS, G., 2006. *Apprentissage et Aide à la Décision pour la Modélisation Déclarative de Scènes*. Thèse de Doctorat, Université de Limoges. Limoges. France.

BARRENECHE, Raul, 2005. *Nouveaux Musées*. Phaidon Press Ltd. ISBN 0714894869.

BENTLEY, Peter J. (éd.), 1999. *Evolutionary Design by Computers*. Morgan Kaufmann. ISBN 155860605X.

BERNE, George, 2011. *Lumière naturelle et artificielle sont indissociables-Entretien avec Georges Berne, agence 8'18"*. In : *D'Architecture*. novembre 2011. n° 204.

BODKIN, Thomas et GOLDSCHIEDER, Ludwig, 1940. *The Paintings of Jan Vermeer*. Oxford University Press.

BOUDON, Philippe, 1997. *Réflexions sur l'idée de « sciences de la conception » chez H.Simon*. In : *Les sciences de la conception sont-elles énonçables et enseignables ?*. 1997. p. 237 - 241.

BOURGEOIS, D., REINHART, C. F. et WARD, G., 2008. *Standard daylight coefficient model for dynamic daylighting simulations*. In : *Building Research & Information*. janvier 2008. Vol. 36, n° 1, p. 68 - 82. DOI 10.1080/09613210701446325.

CALDAS, L. G. et NORFORD, L. K., 2003. *Genetic Algorithms for Optimization of Building Envelopes and the Design and Control of HVAC Systems*. In : *Journal of Solar Energy Engineering*. 2003. Vol. 125, n° 3, p. 343. DOI 10.1115/1.1591803.

CERVANTÈS, Isabelle, 2012. *Identification et caractérisation des ambiances lumineuses en milieu architectural. Comment passer de l'idée d'ambiance lumineuse à une solution architecturale*. Mémoire de Master recherche. Nancy. Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (UMR MAP/CRAI)-Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.

- CERVER, Francisco Asencio, 2005. *Demeures du monde*. Könemann. ISBN 3833116889.
- CHAABOUNI, Salma, 2011. *Voir, savoir, concevoir: une méthode d'assistance à la conception d'ambiances lumineuses par l'utilisation d'images références*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France.
- CHEVRIER, C, CHARBONNEAU, N, GRUSSENMEYER, P et PERRIN, J.P, 2009. *Elaboration de nouvelles configurations à partir de cas existants du patrimoine bâti*. In : *Conception Architecturale Numérique & Approches environnementales*. Nancy : Presses universitaires de Nancy (PUN). 2009.
- CHOAY, Françoise, 1996. *La Règle et le modèle : sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme*. Paris : éd. du Seuil. ISBN 2020300273.
- CIRIANI, Henri, 1991. *Lumières de l'espace*. In : *L'architecture d'aujourd'hui*. 1991. n° 274.
- CONAN, Michel, 1990. *Concevoir un projet d'architecture*. L'Harmattan. ISBN 2738407951.
- CORBUSIER, Le, 1923. *Vers une architecture*. Editions Flammarion. ISBN 2081217449.
- CORBUSIER, Le, 1930. *Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme*. Paris : Crès. ISBN 2909893065.
- COYNE, B et SPROAT, R, 2002. *WordsEye Workspace*. In : [en ligne]. 2002. [Consulté le 11 janvier 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.wordseye.com/workspace>.
- DEMERS, 1997a. *The Sanctuary of Art: images in the assessment and design of light in architecture*. Angleterre : University of Cambridge.
- DEMERS, Claude, 1997b. *Étude préparatoire au plan lumière de la capitale nationale du Québec*. Québec. DEMERS POTVIN INC- Ambiances physiques.
- DEMERS, Claude, 2000. *Light and the Digital Image: A proposed framework for design and analysis*. In : *PLEA (Passive Low Energy in Architecture)*.
- DEMERS, Claude et POTVIN, A., 2004. *LUMcalcul 2.01: prédiction de la lumière naturelle pour la conception architecturale*. In : *Proceedings of eSIM2004, Vancouver*. 2004. p. 9–11.
- DIEPENS, Jan, BAKKER, Ferry et ZONNEVELDT, Laurens, 2000. *Daylight Design Variations Book - by the TNO-TUE Centre for Building Research*. In : [en ligne]. 2000. [Consulté le 10 janvier 2013]. Disponible à l'adresse : <http://sts.bwk.tue.nl/daylight/varbook/index.htm>.
- DUBOIS, M. C., 2006. *Integration of daylight quality in the design studio: from research to practice*. In : *PLEA2006-The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Suisse. 2006.
- ESTEVEZ, Daniel, 2001. *Dessin d'architecture et infographie : L'évolution contemporaine des pratiques graphiques*. CNRS Editions. ISBN 227105799X.
- EVELIEN, Verdonck, LIEVE, Weytjens, GRIET, Verbeeck et HUBERT, Froyen, 2011. *Design Support Tools in Practice. The Architects' Perspective*. In : *Proceedings of the 14th International Conference on Computer-Aided Architectural Design*. Liège-Belgium . 4 juillet 2011. p. 769 - 784.
- FIXMER, P, CHAABOUNI, S, GREGORI, N et BRASSAC, C, 2010. *Conception collaborative d'une esquisse à l'aide d'un dispositif numérique de design architectural*. In : *Séminaire de Conception Architecturale Numérique SCAN'10*. Marseille, France . décembre 2010.
- FOGEL, Lawrence J., OWENS, Alvin J. et WALSH, Michael John, 1966. *Artificial intelligence*

through simulated evolution. Wiley.

FONTOYNONT, Marc, PERRAUDEAU, Michel, AVOUAC, Pascale et LAUBY, Jean-Marc, 2011. *Construire avec la lumière naturelle*. Champs-sur-Marne : CSTB éd. ISBN 9782868914873.

FRANDSEN, Sophus, 1989. *The scale of light-a new concept and its applications*. In : *2nd European conference on Architecture*. Paris, FRANCE : Theo C. Steemers-Wolfgang Palz/Commission of the European Communities. 1989.

GALLAS, MA, 2011. *Fiche d'évaluation des outils de simulation et d'aides à la conception en Architecture*. In : 2011.

GALLAS, Mohamed Anis, BUR, Didier et HALIN, Gilles, 2010. *Lumière naturelle et énergie en phase amont de conception. Vers une méthode d'aide à la conception à partir des intentions du concepteur*. In : *4ème Séminaire de Conception Architecturale Numérique*. Marseille, France. décembre 2010.

GALLAS, Mohamed-Anis, 2009. *La lumière naturelle en phase de conception: quels méthodes et outils pour l'architecture? Mémoire de Master recherche*. Nancy. Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (UMR MAP/CRAI)-Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.

GHOLIPOUR, Vida, 2011. *Éco-conception collaborative de bâtiments durables*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France.

GLASER, Daniel, VOUNG, Jan, XIAO, Ling, TAI, Bonnie, UBBELOHDE, M. Susan, CANNY, John et DO, Ellen Yi-Luen, 2003. *LightSketch*. In : *CAAD Futures*. p. 371 - 382.

GOUJET, Marine, 2007. *Lumière d'Architectes, Lumières de Cinéastes*. Mémoire de fin d'études. Paris. ENS Louis lumière-La Cité du Cinéma.

GRATIA, Elisabeth et DE HERDE, André, 2003. *Design of low energy office buildings*. In : *Energy and Buildings*. juin 2003. Vol. 35, n° 5, p. 473 - 491. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00160-3.

HALIN, Gilles, 1989. *Apprentissage pour la recherche interactive et progressive d'images: processus EXPERIM et prototype RIVAGE*. Thèse de doctorat. Université Nancy I. Nancy, France.

HÉGRON, Gérard, 2003. *De la modélisation à la conception assistée par ordinateur, La modélisation déclarative*. In : *Les annales des ponts et chaussées*. p. 107 - 108.

HICHRI, N, STEFANI, C, DE LUCA, L et VERON, P, 2013. *Review of the « as-buildBIM » approches*. In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Trento, Italy . p. 107 - 112.

HOLLAND, John Henry, 1975. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University of Michigan Press. ISBN 9780472084609.

HOPKINSON, Ralph Galbraith, 1963. *Architectural physics: lighting*. H. M. Stationery Off.

HOWARD, T. J, CULLEY, S. J. et DEKONINCK, E., 2008. *Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature*. In : *Design studies*. 2008. Vol. 29, n° 2, p. 160–180.

JAKUBIEC, J. A et REINHART, C. F, 2011. *DIVA 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3D, Daysim and EnergyPlus*. In : *Building Simulation*. Sydney. Australia.

JODIDIO, Philip, 2012. *Tadao Ando, Complete Works 1975-2012*. TASCHEN FRANCE.

ISBN 3836528134.

JOHNSON, Nell E., 1975. *Light Is the Theme: Louis I Kahn and the Kimball Art Museum*. Revised edition. Kimbell Art Museum. ISBN 0912804033.

JUNGSMANN, Jean-Paul, 1996. *Ombres et lumières : Un manuel de tracé et de rendu qui considère l'architecture comme une machine optique*. Editions de la Villette. ISBN 2903539316.

KAHN, Louis I., 2006. *Silence et lumière. Linteau*. ISBN 2910342042.

KOOLHAAS, Rem et MAU, Bruce, 1997. *S, M, L, XL*. 2nd edition. The Monacelli Press. ISBN 1885254865.

KOZA, John R., 1994. *Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs*. First. A Bradford Book. ISBN 0262111896.

L'ARCHITECTURE D'AUJOURD'HUI, 1991. *Lumières de l'espace*. In : 1991. Vol. numéro spécial, n° 274.

LAM LO, Wing et STEEMERS, Koen, 2009. *The art of brightness and darkness: a critical investigation on daylighting quality*. In : *Architecture Energy and the Occupant's Perspective*. Québec, Canada : Claude Demers-André Potvin. 2009.

LASSANCE, Guilherme, 1998. *Analyse du rôle des références dans la conception, éléments pour une dynamique de représentation du projet d'ambiance lumineuse en architecture*. Thèse de doctorat. Université de Nantes. Nantes, France.

LAWSON, Bryan, 2006. *How designers think: the design process demystified*. Elsevier. ISBN 9780750660778.

LEBAHAR, Jean-Charles, 1983. *Le dessin d'architecte : simulation graphique et réduction d'incertitude*. Roquevaire-France : Editions Parenthèses-Diffusion Presses universitaires de France. ISBN 9782863640227.

MAHDAVI, A., FEURER, S., REDLEIN, A. et SUTER, G., 2003. *An inquiry into the building performance simulation tools usage by architects in Austria*. In : *Eighth International IBPSA Conference*.

MARIN, P, MARSAULT, X, SALERI, R, DUCHANOIS, G et BIGNON, J-C, 2012. *L'Eco-Conception Générative, une illustration de la pensée complexe*. In : *Complexité(s) des modèles de l'architecture numérique*. Paris, France : Presses universitaires de Nancy. juin 2012. p. 267.

MARIN, Philippe, 2010. *Exploration des mécanismes évolutifs appliqués à la conception architecturale. Mise en oeuvre d'un algorithme génétique guidé par les qualités solaires passives de l'enveloppe*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France.

MESTELAN, Patrick, 2005. *L'ordre et la règle : vers une théorie du projet d'architecture*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN 2880746493.

MICHEL, Laurent, 1999. *Méthode expérimentale d'évaluation des performances lumineuses de bâtiments [en ligne]*. Lausanne, Suisse : EPFL. [Consulté le 3 décembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://infoscience.epfl.ch/record/32519>.

MUDRI, L., 2002. *Luminous ambience, quantitative/qualitative data and subjective response*. In : *First International Workshop on Architectural and Urban Ambient Environment*. Nantes.

- MUDRI, L. et LENARD, JL, 1999. *Measurements and Qualification of Luminous Ambience in Daylighting*. In : PLEA. 1999. p. 565–570.
- PASCALE, Blin, 2008. *Jacques Ripault Carnets de Croquis 2. A Tempera*. ISBN 2907687050.
- PAULY, Danièle, 1980. *Ronchamp: lecture d'une architecture*. Association des publications près les universités de Strasbourg. ISBN 9782708004818.
- PORADA, Mikhaël, 1997. *Conception architecturale, simulation et approche analogique*. In : *Les sciences de la conception sont-elles énonçables et enseignables ?* 1997. p. 67 - 76.
- PROST, Robert, 1992. *Conception architecturale: une investigation méthodologique*. Paris : L'Harmattan. ISBN 2738412408.
- RAYNAUD, D., 2008. *Le schème, opérateur de la conception architecturale, II: Le cas de la conservation du modèle morphologique*. In : *Arquiteturarevista*. 2008. n° 1, p. 15–32.
- RECHENBERG, Ingo, 1973. *Evolutionsstrategie. Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. (=Problemata Frommann-Holzboog; 15) Frommann Stuttgart. ISBN 3772803733.
- REITER, Sigrid et DE HERDE, André, 2004. *L'éclairage naturel des bâtiments*. Louvain-la-Neuve Belgique : Presses universitaires de Louvain. ISBN 9782124755578.
- RENNARD, Jean-Philippe, 2002. *Vie artificielle. Où la biologie rencontre l'informatique*. Vuibert. ISBN 2711786943.
- ROBINSON, D. et STONE, A., 2004. *Irradiation modelling made simple: the cumulative sky approach and its applications*. In : *PLEA Conference*. 2004. p. 19–22.
- SCHITTICH, Christian (éd.), 2002. *In Detail: Japan - Architects, Constructions, Ambiance*. Birkhäuser Basel. ISBN 3764367571.
- SCHMITT, L, GREGORI, N et BRASSAC, C, 2012. *Observer la créativité: une proposition méthodologique*. In : *Complexité(s) des modèles de l'architecture numérique*. Paris, France : Presses universitaires de Nancy. juin 2012. p. 267.
- SCHOENAUER, Marc et SEBAG, Michèle, 2007. *Un état des lieux de l'optimisation évolutionnaire et de ses implications en sciences pour l'ingénieur*. In : *Traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux*. 2007. Vol. 2, p. 187 - 259.
- SIMON, Herbert A., 2004. *Les sciences de l'artificiel*. Editions Gallimard. ISBN 2070301524.
- SIRET, D., 1997. *Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural: application à l'ensoleillement*. Thèse de doctorat. Université de Nantes- ISITEM-École d'Architecture de Nantes. Nantes, France.
- TEDESCHI, Arturo, 2011. *Parametric architecture with Grasshopper®: primer*. Brienza, Italy : Le Pensur. ISBN 9788895315102.
- TOURRE, 2007. *Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural*. Thèse de doctorat. Université de Nantes. Nantes, France.
- TREGENZA, Peter et LOE, David, 1998. *The Design of Lighting*. 1st ed. Taylor & Francis. ISBN 0419204407.

ULLMAN, David G, 2003. *The mechanical design process*. Boston, Mass. : McGraw-Hill. ISBN 9780072373387.

VÉZINA, Kumiko, 1998. *Survol du monde de l'indexation des images*. In : *Cursus-Périodique électronique étudiant de l'Ecole de bibliothéconomie et des sciences de l'information de l'Université de Montréal*. 1998. Vol. Volume 4, n° Numéro 1.

VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, 1863. *Entretiens sur l'architecture*. Paris : A. Morel et cie.

VITRUVÉ, 1684. *Les dix livres d'Architecture de Vitruve*. Jean Baptiste Coignard. Paris.

WEYTIJENS, L., VERDONCK, E. et VERBEECK, G., 2009. *Classification and Use of Design Tools: The Roles of Tools in the Architectural Design Process*. In : [en ligne]. 2009. [Consulté le 5 février 2013]. Disponible à l'adresse : <http://uhdspace.uhasselt.be/dspace/handle/1942/13310>.

ZEILER, Win, SAVANOVIC, Perica et QUANJEL, Emile, 2007. *Design decision support for the conceptual phase of the design process*. In : *IASDR 07, International Association of Societies of Design Research*. Hong Kong.

ZUMTHOR, Peter, 2008. *Penser l'architecture*. Springer. ISBN 9783764384531.

Filmographie

LANG, Fritz, 1927. *Metropolis*. UFA (Universum-Film AG). 1927.

LUCAS, George, 1971. *THX 1138*. Solaris Distribution. 1971.

SIZA, Alvaro, 2001. *ARTE Architecture*.

WELLES, Orson, 1941. *Citizen Kane*. 1941.

Table des illustrations

Liste des figures

Fig 1. Eglise Saint-Etienne-Nevers (1063-1097)	10
Fig 2. Vue intérieure et coupe de la Cathédrale d'Amiens (1220-1269)	11
Fig 3. Le Crystal Palace (1850-1854)	12
Fig 4. Pavillon de Barcelone (1929).....	13
Fig 5. Apple Store de New York.....	14
Fig 6. Kunsthaus-Graz (2001-2002).....	15
Fig 7. Mise en valeur d'un élément architectural, La Maison Hakuei-Akira Sakamoto/Mise en valeur de la fonction d'un espace, Church of light-Tadao Ando [(Cerver, 2005) / (Jodidio, 2012)]	16
Fig 8. 3 espaces / 3 identités différentes [site officiel de Campo Baeza (Jodidio, 2012)/(Cerver, 2005)]	17
Fig 9. Une lumière qui révèle les matériaux (droite)/Une lumière qui dissipe les matériaux (gauche)/[(Schittich, 2002)/ ©J.C Bignon]	18
Fig 10. Lumière qui dissimule/révèle la structure [(Barreneche, 2005)/Site officiel du département d'architecture-université technologique d'Helsinki-wood program].....	18
Fig 11. Aspects ondulatoire et corpusculaire de la lumière (Reiter, De Herde, 2004) / Propriétés du spectre visible de la lumière naturelle	22

Fig 12. Spectres lumineux de sources électriques / Spectres lumineux d'une source thermique (Baker, K. A. Steemers, 2002)	23
Fig 13. Comportement de la lumière au contact des surfaces de matériau transparent ou opaque	23
Fig 14. Différents modes de réflexion et de transmission de la lumière (Reiter, De Herde, 2004).....	24
Fig 15. Synthèse additive / Synthèse soustractive.....	25
Fig 16. Définition de la couleur d'un objet opaque / d'un objet transparent	25
Fig 17. Types de grandeurs photométriques.....	26
Fig 18. Flux lumineux	27
Fig 19. Intensité lumineuse / angle solide	28
Fig 20. Eclairement lumineux / Rapport éclairement-intensité lumineuse / Exemples de niveaux d'éclairements	28
Fig 21. La luminance des surfaces éclairées	29
Fig 22. Mode de calcul du FLJ	29
Fig 23. Spectre solaire (Architecture et Climat, 2012).....	30
Fig 24. Parcours du rayonnement solaire à travers l'espace (Architecture et Climat, 2012) / l'atmosphère.....	31
Fig 25. Equinoxes printemps et automne/solstice d'été (Architecture et Climat, 2012)	31
Fig 26. Azimut et hauteur du soleil (Architecture et Climat, 2012) / Variation des moyennes annuelles d'apport solaire [SolarGIS © 2012 GeoModel Solar]	32
Fig 27. Variation de la puissance du rayonnement solaire sur la surface de la terre selon le type de ciel / les types de rayonnements solaires.....	32
Fig 28. Variation de l'apport solaire selon l'orientation et l'inclinaison des faces en Belgique (Architecture et Climat, 2012).....	33
Fig 29. Masques solaires naturels / réflexion du rayonnement solaire par le sol	33
Fig 30. Obstruction des rayonnements solaires par l'environnement bâti / réflexion des rayonnements solaires par des écrans internes et externes au projet	34
Fig 31. Les composantes régissant le rapport entre le rayonnement solaire et espace architectural.....	35

Fig 32. Influence du rapport largeur/profondeur sur le comportement lumineux d'un espace.....	36
Fig 33. Influence de l'échelle de l'espace architectural sur comportement lumineux.....	36
Fig 34. Rapport entre le taux d'ouverture et la moyenne d'éclairement obtenue.....	37
Fig 35. Influence du rapport de proportion sur le comportement d'une ouverture.....	38
Fig 36. Influence de la position de l'ouverture sur le comportement de la lumière naturelle dans un espace architecturale.....	39
Fig 37. Influence du nombre d'ouvertures sur le comportement lumineux d'un espace architecturale.	39
Fig 38. Influence de l'orientation d'une ouverture sur le comportement lumineux d'un espace.....	40
Fig 39. Influence de la disposition des ouvertures sur le comportement lumineux de l'espace architectural.....	41
Fig 40. Influence du type de vitrage sur la quantité et la qualité de lumière d'un espace architectural	42
Fig 41. Influence du type d'ouverture sur le comportement lumineux de l'espace.....	42
Fig 42. Influence des facteurs de réflexion et de rugosité / la clarté des parois et sur la propagation et la diffusion de la lumière.....	44
Fig 43. Influence des masques internes sur le comportement lumineux d'un espace.....	45
Fig 44. Influence des masques externes sur le comportement lumineux d'un espace	46
Fig 45. Le martyr de Saint Matthieu / Vocation de Saint Matthieu - Le Caravage (1599-1600)	47
Fig 46. La laitière - Johannes Vermeer (1656-1660) / Femme lisant une lettre - Gabriel Metsu (1662-1665).....	48
Fig 47. La pie (1869) / La promenade (1875) - Claude Monet	49
Fig 48. Abbaye de Valsaintes (XII) - Couvent de la Tourette (Le Corbusier, 1957) - The Church of light (Tadao Ando, 1989).....	50
Fig 49. Chapelle de Ronchamp- Le Corbusier (1950-1955) / La cité internationale de la Dentelle et de la Mode de Calais - Moatti et Rivière (2006-2009).....	51
Fig 50. Eclairage des scènes dans Citizen Kane (Welles, 1941).....	52
Fig 51. Jardin suspendu - Metropolis (Lang, 1927) / Cellule - THX 1138 (Lucas, 1971)	53

Fig 52. Méthode d'identification des patterns de lumière (Demers, 1997b).....	55
Fig 53. Espace fonctionnel/profane (gauche) - Espace sacré/Poétique (droite)	56
Fig 54. Echelle des ombres et échelle de la lumière (Frandsen, 1989) / Qualification de la lumière (Dubois, 2006).....	57
Fig 55. Echelle des contrastes et échelle de la focalisation (Demers, 1997b).....	58
Fig 56. Caractérisation quantitative et qualitative de la lumière naturelle (Mudri, Lenard, 1999)	59
Fig 57. Comparaison de modèles de processus de conception en ingénierie (Howard et al., 2008).....	63
Fig 58. Progression de la disponibilité des informations et leurs influences durant les phases du processus de conception (Zeiler et al., 2007)	65
Fig 59. Progression des connaissances au tour du problème de conception par rapport à celle de la liberté de conception durant le processus de conception (Ullman, 2003).....	65
Fig 60. Salle d'exposition du Musée d'Art de Kimbell au Texas, L.Kahn [site du Kimbell Art Museum]	68
Fig 61. Croquis d'analyse (gauche) / Croquis d'études (droite) dessinés par Campo Baeza [Site officiel de Campo Baeza].....	70
Fig 62. Maquettes d'études des effets lumineux/Campo Baeza [site officiel de Campo Baeza].....	71
Fig 63. Simulation photo-réaliste/simulation des FLJ [site officiel de Prairie Architectes INC].....	71
Fig 64. Caractérisation de la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases du processus de conception architecturale.....	72
Fig 65. Différentes formes de références : Les dix livres d'architecture de Vitruve (Vitruve, 1684) / Entretiens sur l'architecture d'Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc (Viollet-Le-Duc, 1863) / Vers une Architecture/LeCorbusier (Corbusier, 1923) / S, M, L, XL/Rem Koolhaas et Bruce Mau (Koolhaas, Mau, 1997).....	76
Fig 66. Définition et caractérisation des typologies d'espace et d'ouverture selon Guilherm Lassance (Lassance, 1998).....	78
Fig 67. Interface de Day@mbiance (Salma Chaabouni, 2011)	79
Fig 68. Interface et fonctions de "Daylight Design Variation Book" (Diepens et al., 2000)	79

Fig 69. Méthode de création et de combinaison d'effets de lumière naturelle à partir d'images de référence (Demers, 2000).....	80
Fig 70. Manuels de conception :Daylight design of buildings / Nick Baker et Koen Steemers (Baker, K. A. Steemers, 2002) / L'éclairage naturel des bâtiments/Sigrid Reiter et André De Herde (Reiter, De Herde, 2004) / Construire avec la lumière naturelle / Marc Fontoynt, Michel Perraud, Pascale Avouac et Jean-Marc Lauby (Fontoynt et al., 2011).....	81
Fig 71. Exemples d'abaques graphiques : tracé des ombres portées en dessin géométral (gauche) et à l'aide du diagramme solaire MT (droite) (Siret, 1997).....	82
Fig 72. Interface de la feuille de calcul LUMcalcul® (Demers, Potvin, 2004).....	83
Fig 73. Exemples de maquettes : maquette Hôtel Dieu de Beaune, France, maquette en paille du XVIIIème / Le Corbusier et la maquette de la Villa Savoye, France, 1928 / maquettes d'études du Centre Pompidou de Metz, France, 2006	84
Fig 74. Le Model 126 Heliodon - Texas A&M's College of Architecture / Le ciel artificiel - Université Laval / Le SkyDome - The Welch School of Architecture	85
Fig 75. Intérieur d'une maquette utilisée pour un ciel artificiel (facteur de réflexion du mur de fond 80% et le reste des parois 50% - taux de transmission du vitrage 92%)	86
Fig 76. outils de représentation 2D et 3D utilisant un modèle numérique géométrique (AutoCad® et Sktechup®).....	89
Fig 77. Exemple de logiciel de BIM (Revit®)	93
Fig 78. Structure du processus de modélisation déclarative.....	94
Fig 79. Processus de modélisation déclaratif proposé par Wordseye® (Coyne, Sproat, 2002).....	95
Fig 80. Interface et fonctions de Solimac (Siret, 1997).....	96
Fig 81. Principe de fonctionnement et résultats de la méthode déclarative proposée par Vincent Tourré (Tourre, 2007)	97
Fig 82. Processus et résultats du modèle déclaratif <i>LightSketch</i> extrait de (Glaser et al., 2003)	98
Fig 83. Processus d'un algorithme évolutionnaire.....	99
Fig 84. Solutions générées par la méthode d'optimisation multi-objectifs (Caldas, Norford, 2003)..	100
Fig 85. Exemples d'algorithmes d'optimisation sous <i>Grasshopper</i> ® (<i>Galapagos</i> ® et <i>Goat</i> ®).....	101

Fig 86. Processus d'un modèle numérique de simulation	103
Fig 87. Syntaxe de modélisation géométrique et format des résultats de calculs fournis par <i>Radiance</i> [®]	104
Fig 88. Processus et interface de <i>Daysim</i> [®]	105
Fig 89. Processus de fonctionnement, interface et résultats de <i>Diva-For-Rhino</i> [®] (plug-in de connexion entre <i>Rhinoceros</i> [®] / <i>GrassHopper</i> [®] et <i>Radiance</i> [®])	107
Fig 90. Fenêtres de modélisation géométrique, d'export vers les modèles de simulation et de visualisation des résultats dans <i>Ecotect</i> [®]	107
Fig 91. Import et mise à jour de la géométrie de <i>Sketchup</i> [®] vers <i>ArchiWizard</i> [®]	109
Fig 92. Fenêtres de saisie, de paramétrage et de simulation de <i>Velux Visualizer</i> [®] (haut) et de <i>Leso Dial</i> [®] (bas)	110
Fig 93. Classification des méthodes d'assistance	110
Fig 94. Taux d'utilisation des méthodes d'assistance à la conception par les architectes Flamants (Evelien et al., 2011)	117
Fig 95. Objectifs d'utilisations des logiciels d'assistance à la conception	120
Fig 96. Les modes de représentations des outils d'assistance et leurs niveaux d'adaptations à la conception architecturale (MA Gallas, 2011)	121
Fig 97. Attentes des étudiants en matière de méthodes et d'outils d'assistance à la conception (MA Gallas, 2011)	122
Fig 98. Processus de la méthode proposée	129
Fig 99. Classification des effets de lumière naturelle en milieu architectural	134
Fig 100. Caractérisation des effets de lumière naturelle dans des projets de référence (Inspection Académique)	139
Fig 101. Evaluation des configurations générant un effet de type "Lumière rasante"	142
Fig 102. Processus de génération de solutions	146
Fig 103. Activités de la phase de prise de connaissance	147
Fig 104. Activités de la phase d'appropriation	149

Fig 105. Processus et activités de la phase de déclaration des intentions	155
Fig 106. Modules et environnement logiciel d'implémentation de Day@mbiance.....	155
Fig 107. Interface de l'outil d'indexation <i>Image</i>	156
Fig 108. Modèle de la base de données d'images utilisée par Day@mbiance	157
Fig 109. Interface de navigation de Day@mbiance	158
Fig 110. Processus et activités de la phase de génération et d'évaluation des solutions.....	159
Fig 111. Modules et environnements d'implémentation de <i>DaylightBox</i>	160
Fig 112. Interface et fonctions des modules d'identification et de sélection des intentions	161
Fig 113. Structure et composants du module " <i>Base d'images</i> "	162
Fig 114. Les entrées, les sorties et la visualisation de la géométrie créée par le module " <i>Géométrie</i> ".....	164
Fig 115. Les modules et les composants de simulation et de visualisation des apports solaires.....	165
Fig 116. Paramètres d'entrée et de configuration de l'algorithme génératif " <i>Galapagos</i> [®] "	167
Fig 117. Modélisation de la base de connaissances	168
Fig 118. Entrées et sorties du module " <i>Base de connaissances</i> "	169
Fig 119. Structure et extrait de la base de données des solutions.....	169
Fig 120. Paramètres d'entrée et de configuration du module " <i>stockage solution</i> "	170
Fig 121. Processus et activités de la phase de prise de connaissance.....	172
Fig 122. Modules et environnements d'implémentation de <i>DaylightViewer</i>	172
Fig 123. Les entrées et les paramètres de configuration du module " <i>Visualisation</i> "	173
Fig 124. Affichage de la grille de solutions sous <i>Rhinoceros</i> [®]	174
Fig 125. Les entrées et les résultats du composant " <i>Daylight</i> "	175
Fig 126. Interface de personnalisation des solutions générées.....	176
Fig 127. Dispositif d'expérimentation	183
Fig 128. Site d'implantation du projet	185

Fig 129. Cheminement des activités de conception des sessions d'expérimentation pour chacun des groupes	190
Fig 130. Démarches de conception des groupes d'étudiants.....	191
Fig 131. Formulation du problème de conception et implantation du projet (groupe 2).....	191
Fig 132. Proposition d'une configuration spatiale pour le projet (groupe 2 et 5).....	193
Fig 133. Parcours et sélection solutions (groupe 2 et 5).....	193
Fig 134. Simulation de la lumière naturelle pour trois horaires différents (groupe 7).....	194
Fig 135. Personnalisation des solutions générées (groupe 2, 6 et 7).....	194
Fig 136. Combinaison des effets générés (groupe 3)	195
Fig 137. Implémentation des résultats de génération et de personnalisation des solutions dans le projet	195
Fig 138. Validation finale de la proposition en utilisant les fonctions de simulation des ombres sous <i>Sketchup</i> ® (groupe 5).....	196
Fig 139. Niveau de maîtrise du comportement de la lumière naturelle durant les phases conceptuelles du projet.....	197
Fig 140. La pertinence de l'utilisation des images pour la déclaration et l'identification des intentions	197
Fig 141. Influence de la navigation dans la grille de solutions sur les choix des concepteurs et niveau de correspondance des solutions aux intentions des concepteurs.....	198
Fig 142. Capacité des solutions à orienter les choix de conception et à explorer de nouvelles pistes de conception	199
Fig 143. Types d'évaluation et leur influence sur les choix de conception	199
Fig 144. Evaluation de la fonction de personnalisation des solutions et de sa capacité d'exploration de nouvelles pistes de conception	200
Fig 145. Evaluation de l'influence de <i>DaylightGen</i> sur la démarche de conception et de son potentiel d'assistance	201
Fig 146. Evaluation des résultats issus de l'utilisation de <i>DaylightGen</i> et de son potentiel d'échange avec le concepteur	202

Fig 147. Evaluation de la capacité d'adaptation de <i>DaylightGen</i> à un cadre de conception réel	202
---	-----

Liste des tables

Tab 1. Liste des indicateurs qualitatifs de la lumière naturelle (Dubois, 2006)	54
Tab 2. Phases de conception/activités	64
Tab 3. Evolution des types de représentation durant les phases du processus de conception architecturale	66
Tab 4. Normes européennes NF EN 12464-1 d'éclairagisme des lieux de travail.....	67
Tab 5. Eléments principaux du questionnaire	119
Tab 6. Répartition de l'utilisation des logiciels selon les étapes de conception du projet (MA Gallas, 2011).....	120
Tab 7. Liste des indicateurs de caractérisation des types d'effet de lumière	138
Tab 8. Caractérisation des types d'effets de lumière naturelle	140
Tab 9. Profil des étudiants et répartition des groupes	183

Table des matières

SOMMAIRE.....	1
INTRODUCTION	3
PARTIE A. LUMIERE ET ARCHITECTURE	7
CHAPITRE I. LUMIERE NATURELLE EN ARCHITECTURE.....	9
1. <i>Lumière naturelle et architecture.....</i>	9
2. <i>Lumière naturelle et architecte.....</i>	15
3. <i>Synthèse.....</i>	19
CHAPITRE II. LA LUMIERE NATURELLE : PHENOMENE PHYSIQUE ET SENSIBLE.....	21
1. <i>La dimension physique de la lumière naturelle.....</i>	21
1.1 Caractérisation physique	21
1.2 Les sources de lumière.....	22
1.3 Lumière et surface.....	23
1.4 Lumière et couleur	24
1.5 La quantification et la mesure de la lumière	26
1.5.a Le flux lumineux.....	26
1.5.b L'efficacité lumineuse	27
1.5.c L'intensité lumineuse	27
1.5.d L'éclairement.....	28
1.5.e La luminance.....	29
1.5.f Facteur lumière du jour.....	29
1.5.g Le rayonnement solaire.....	30
1.6 Apports solaires et architecture.....	34
1.6.a La configuration architecturale	35
1.6.b L'ouverture	37
1.6.c Les surfaces intérieures.....	43
1.6.d Les masques	45
2. <i>La dimension sensible de la lumière naturelle.....</i>	46
2.1 Lumière et peinture	46
2.2 Lumière et architecture	49
2.3 Lumière et cinéma.....	52
3. <i>Le rapport entre la dimension physique et la dimension sensible de la lumière naturelle.....</i>	54
4. <i>Synthèse</i>	59
CHAPITRE III. LUMIERE ET CONCEPTION ARCHITECTURALE	61
1. <i>Caractérisation du processus de conception architecturale.....</i>	61
2. <i>Prise en compte de la lumière naturelle durant le processus de conception architecturale.....</i>	66
2.1 Intégration durant la phase d'établissement des besoins et d'analyse des tâches.....	66

2.2	Intégration durant la phase de conceptualisation.....	67
2.3	Intégration durant la phase de matérialisation	70
2.4	Intégration durant la phase de conception détaillée.....	71
2.5	Caractérisation de l'intégration de la lumière naturelle dans le processus de conception architecturale.....	72
3.	<i>Synthèse</i>	73
CHAPITRE IV.	NATURE DES METHODES ET DES OUTILS D'ASSISTANCE A LA CONCEPTION	75
1.	<i>Les supports d'assistance exploitant les références</i>	76
1.1	Les documents de références.....	76
1.2	Les outils d'exploration de références	77
1.3	Les manuels techniques.....	80
1.4	Les abaques de représentation et de calcul	81
2.	<i>Supports d'assistance exploitant les modèles physiques</i>	84
3.	<i>Supports d'assistance exploitant les modèles numériques</i>	87
3.1	Supports d'assistance utilisant des modèles numériques géométriques (2D et 3D)	87
3.1.a	Les modèles numériques géométriques.....	87
3.1.b	Modèle géométrique impératif.....	88
3.1.c	Modèle géométrique paramétrique.....	89
3.1.d	Modèle géométrique sémantique	92
3.1.e	Supports de modélisation géométrique déclarative	93
3.2	Supports d'assistance utilisant des modèles génératifs	98
3.3	Supports d'assistance utilisant des modèles de simulation.....	101
4.	<i>Synthèse</i>	110
CHAPITRE V.	METHODES D'ASSISTANCE ET PROCESSUS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE	113
1.	<i>Méthodes d'assistance et phases du processus de conception</i>	113
1.1	Les méthodes adaptées aux phases conceptuelles du projet.....	113
1.2	Les méthodes adaptées aux phases avancées du projet.....	115
2.	<i>Méthodes d'assistances et acteurs de la conception architecturale</i>	116
2.1	Les méthodes d'assistances dans la pratique de la conception architecturale	116
2.2	Les méthodes d'assistances et l'enseignement de l'architecture	118
2.3	Les méthodes d'assistances et la recherche	122
3.	<i>Synthèse</i>	124
PARTIE B. VERS UNE METHODE D'ASSISTANCE A LA PRISE EN COMPTE DE LA LUMIERE NATURELLE DURANT LES PHASES CONCEPTUELLES DU PROJET D'ARCHITECTURE..... 125		
CHAPITRE I.	STRUCTURE DE LA METHODE D'AIDE A LA CONCEPTION	127
1.	<i>Description de la méthode</i>	127
2.	<i>Déclaration des intentions</i>	130
3.	<i>Caractérisation des intentions</i>	132
3.1	Caractérisation sémantique.....	132
3.2	Caractérisation physique	137
3.3	Détermination des fonctions de caractérisation des types d'effet de lumière.....	140
3.3.a	Détermination des indicateurs de performance	141

3.3.b	Mise en relation des indicateurs de performance	141
3.3.c	Formulation des fonctions de caractérisation.....	143
4.	<i>Génération des solutions</i>	145
5.	<i>Prise de connaissance</i>	146
6.	<i>Appropriation des solutions</i>	149
7.	<i>Synthèse</i>	150
CHAPITRE II.	IMPLEMENTATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA CONCEPTION	151
1.	<i>Environnement d'implémentation</i>	151
1.1	La nature de la méthode.....	151
1.2	Le profil des utilisateurs.....	152
1.3	Le profil du développeur.....	152
1.4	Choix de l'environnement de développement.....	153
2.	<i>Processus d'implémentation de l'outil (DaylightGen)</i>	154
2.1	Implémentation de la phase de description des intentions	154
2.1.a	La base de données d'images.....	156
2.1.b	Le module de navigation dans la base de données d'images	157
2.2	Implémentation de la phase de génération de solutions.....	158
2.2.a	Accès à la base d'images indexées.....	160
2.2.b	Le modèle paramétrique.....	162
2.2.c	L'algorithme de simulation de la lumière naturelle.....	164
2.2.d	L'algorithme génératif.....	166
2.2.e	La base de connaissance des types d'effets de lumière.....	168
2.2.f	La base de données de solutions.....	169
2.3	Implémentation de la phase de prise de connaissance	170
2.3.a	Le modèle de visualisation.....	173
2.3.b	Le moteur de simulation de la lumière naturelle.....	174
2.3.c	Le modèle de transformation paramétrique.....	175
3.	<i>Synthèse</i>	177
PARTIE C. EXPERIMENTATION ET VALIDATION DE LA METHODE ET DE L'OUTIL D'ASSISTANCE		
179		
CHAPITRE I.	PROTOCOLE D'EXPERIMENTATION.....	181
1.	<i>Les participants</i>	182
2.	<i>Dispositif expérimental</i>	183
3.	<i>Projet de conception</i>	184
CHAPITRE II.	RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION	187
1.	<i>Analyse des sessions de conception</i>	187
2.	<i>Analyse des résultats du questionnaire</i>	196
2.1	La déclaration et l'identification des intentions	196
2.2	La génération de solutions	197
2.3	Personnalisation des solutions	200
2.4	Evaluation de l'utilisation de l'outil d'assistance	200

3. Synthèse	203
CONCLUSION GENERALE.....	205
REFERENCES	209
TABLE DES ILLUSTRATIONS	215
LISTE DES FIGURES	215
LISTE DES TABLES.....	223
TABLE DES MATIERES	225
ANNEXES.....	229
ANNEXE 1 : FICHES D’EVALUATION ET D’AIDE A LA CONCEPTION EN ARCHITECTURE.....	230
ANNEXE 2 : PROCESSUS ET ACTIVITES DE LA METHODE <i>DAYLIGHTGEN</i>	239
ANNEXE 3 : FONCTIONS DE CARACTERISATION DES TYPES D’EFFET.....	240
ANNEXE 4 : INTERFACE UTILISATEUR DE <i>DAYLIGHTBOX</i>	241
ANNEXE 5 : INTERFACE UTILISATEUR DE <i>DAYLIGHTVIEWER</i>	242
ANNEXE 6 : RETOUR D’EXPERIENCE-EXPERIMENTATION DE <i>DAYLIGHTGEN</i>	243

Annexes

ANNEXE 1 : FICHES D’EVALUATION ET D’AIDE A LA CONCEPTION EN ARCHITECTURE.....	230
ANNEXE 2 : PROCESSUS ET ACTIVITES DE LA METHODE <i>DAYLIGHTGEN</i>	239
ANNEXE 3 : FONCTIONS DE CARACTERISATION DES TYPES D’EFFET.....	240
ANNEXE 4 : INTERFACE UTILISATEUR DE <i>DAYLIGHTBOX</i>	241
ANNEXE 5 : INTERFACE UTILISATEUR DE <i>DAYLIGHTVIEWER</i>	242
ANNEXE 6 : RETOUR D’EXPERIENCE-EXPERIMENTATION DE <i>DAYLIGHTGEN</i>	243

Annexe 1 : Fiches d'évaluation et d'aide à la conception en architecture



Fiche d'évaluation des outils de simulation et d'aide à la conception en Architecture

Cette fiche servira à alimenter un travail de recherche qui s'intéresse aux outils et méthodes d'assistance à la conception dans le domaine de la lumière naturelle. Ce travail est dirigé par Didier Bur / Gilles Halin et réalisé par Mohamed-Anis Gallas au sein du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie - MAP/CRAI de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.

Pour valider vos réponses cliquer sur le bouton "Envoyer" en bas de la page.

Merci d'avance pour votre participation.

En cas de problèmes techniques ou autres, envoyer un mail à: gallas@crai.archi.fr

Date limite pour envoyer la fiche: Fin Novembre 2012

***Obligatoire**

Informations personnelles

Toutes ces informations resteront confidentielles et serviront juste à créer un corpus d'étude.

Nom *

Prénom *

Profil *

Type de formation. Vous pouvez sélectionner plusieurs types de formations

☐ Architecte

☐ Architecte d'intérieur

☐ Ingénieur

☐ Autre :

Niveau d'étude *

☐ Master 1

☐ Master 2

☐ Autre :

Spécialité

☐ Master 2 spécialité AME

☐ Master 2 spécialité ACC

☐ Master 2 spécialité AVT

☐ Master 2 spécialité AHP

☐ Autre :

Expériences professionnelles

Type *

☐ Stage

☐ Emploi

☐ Aucune

☐ Autre :

Durée

Durée totale de vos expériences professionnelles

☐ 1-6 mois

☐ 6-12 mois

☐ 1-2 ans

☐ 2-5 ans

☐ 5-10 ans

☐ Plus 10 ans

☐ Autre :

Lumière naturelle et projet architectural

1. Pensez-vous aux effets et ambiances de lumière naturelle lorsque vous faites un projet d'architecture? *

Si vous répondez par "Non", aller à la question N°4

- ☐ Oui
☐ Non

2. Si oui, comment cette pensée s'exprime-t-elle?

Par quoi exprimez-vous votre intérêt pour la lumière naturelle

- ☐ Un effet lumineux que vous cherchez à produire (taches de soleil sur le sol...)
☐ Une ambiance lumineuse que vous cherchez à produire (des zones claires et d'autres sombres...)
☐ Une qualité de lumière naturelle
☐ Une quantité de lumière naturelle
☐ Autre :

3. A quelle phase de conception de votre projet cette pensée s'exprime-t-elle?

A quelles étapes de conception de votre projet

- ☐ Au début (phase d'esquisse)
☐ En cours (mise en forme du projet)
☐ A la fin (phase de finalisation)
☐ Jamais
☐ Autre :

4. Avez-vous le sentiment que vous maîtrisez le comportement de la lumière naturelle dans vos projets *

La capacité de prévoir les effets de lumière produits dans vos projets, la quantité, la qualité...

- ☐ Oui
☐ Non

5. Si oui, pourquoi?

- ☐ Grâce à votre expérience
☐ Grâce à la documentation (documents techniques, références...)
☐ Grâce aux outils d'assurances (Logiciels, didacticiels...)
☐ Autre :

6. Si non, pourquoi?

- ☐ A cause du manque d'expérience
☐ A cause du manque d'intérêt pour la lumière naturelle

☐ Autre :

7. Pour décrire ou parler de la lumière naturelle dans un projet, quels termes utilisez-vous? *

Quels sont les termes que vous utilisez pour décrire la lumière naturelle dans vos projets

- ☐ Lux, candélas...
- ☐ Facteur de Lumière du Jour (FLJ)
- ☐ Des termes de type: lumière chaude, froide
- ☐ Des termes de type: lumière contrastée, en fond de pièce
- ☐ Aucun
- ☐ Autre :

8. Pensez-vous que la lumière naturelle peut influencer vos projets d'architecture? *

Influencer la qualité de vos espaces conçus...Si vous répondez par "Non", aller à la question N°10

- ☐ Oui
- ☐ Non

9. Si oui, par quoi cette influence pourrait être exprimée?

Ce que la lumière naturelle pourrait influencer dans votre projet

- ☐ La qualité de l'espace conçu
- ☐ Les ambiances spécifiques à l'intérieur du projet
- ☐ Le confort
- ☐ Le rapport avec l'extérieur
- ☐ La fonction du projet
- ☐ La couleur des espaces intérieurs
- ☐ Les dimensions du projet
- ☐ Les ouvertures
- ☐ Autre :

10. Pensez-vous que la lumière naturelle peut influencer l'aspect énergétique de votre projet? *

Si vous répondez par "Non", aller à la question N°12

- ☐ Oui
- ☐ Non

11. Si oui,quels sont les aspects du projet concernés par cette influence ?

- ☐ Les apports solaires
- ☐ L'éclairage artificiel
- ☐ Le chauffage/ la climatisation
- ☐ Les masques solaires (brise soleils...)

☐ Autre :

Outils et méthodes d'assistance à la conception

12. Quels outils ou méthodes d'assistance utilisez-vous? *

Si vous répondez par "Aucun", allez à la question N°22.

- ☐ Logiciels
- ☐ Documents techniques
- ☐ Didacticiels
- ☐ Références
- ☐ Aucun
- ☐ Autre :

13. Dans quels domaines?

- ☐ Lumière naturelle
- ☐ Lumière artificielle
- ☐ Structure
- ☐ Energie et thermique
- ☐ Profil environnemental
- ☐ Acoustique
- ☐ Fluide
- ☐ Aucun
- ☐ Autre :

14. Quels logiciels d'assistance utilisez-vous?

Si vous répondez par "Aucun", allez à la question N°22.

- ☐ Dialux
- ☐ Pleiades+Comfie
- ☐ Archiwizard
- ☐ Ecodesigner (plugin Archicad)
- ☐ Eco-Mod
- ☐ Eco-Profil
- ☐ Energyplus
- ☐ Radiance
- ☐ Velux Daylight Visualizer 2
- ☐ Aucun
- ☐ Autre :

15. A quelles étapes de conception de votre projet?

Si vous utilisez un ou plusieurs logiciels à différentes étapes de conception de votre projet,

veuillez le mentionner dans le champ "Détails".

	Début (phase d'esquisse)	En cours (mise en forme du projet)	A la fin (phase de finalisation)
Dialux	☐	☐	☐
Pleiades+Comfie	☐	☐	☐
Archiwizard	☐	☐	☐
EcoDesigner (plugin Archicad)	☐	☐	☐
Eco-Mod	☐	☐	☐
Eco-Profil	☐	☐	☐
Energyplus	☐	☐	☐
Radiance	☐	☐	☐
Velux Daylight Visualizer 2	☐	☐	☐
Autre	☐	☐	☐

*Détails

Si vous utilisez un ou plusieurs logiciels à différentes étapes de conception de votre projet, veuillez le mentionner dans le champ "Détails".

16. Pourquoi avez-vous utilisé ces logiciels?

- ☐ Chercher des solutions à des problèmes de conception
- ☐ Valider des choix de conception
- ☐ Chercher des idées de conception
- ☐ Evaluer des solutions
- ☐ Autre :

17. L'interface de ces logiciels est-elle adaptée à vos besoins?

	Non-adaptée	Moyennement adaptée	Adaptée
Dialux	☐	☐	☐

Pleiades+Comfie	☐	☐	☐
Archiwizard	☐	☐	☐
EcoDesigner (plugin Archicad)	☐	☐	☐
Eco-Mod	☐	☐	☐
Eco--Profil	☐	☐	☐
Energyplus	☐	☐	☐
Radiance	☐	☐	☐
Velux Daylight Visualizer 2	☐	☐	☐
Autre	☐	☐	☐

18. Comment trouvez-vous les résultats fournis par ces logiciels?

	Très complexes et loin de vos domaines de compétences	Difficilement compréhensibles	Compréhensibles
Dialux	☐	☐	☐
Pleiades+Comfie	☐	☐	☐
Archiwizard	☐	☐	☐
EcoDesigner (plugin Archicad)	☐	☐	☐
Eco-Mod	☐	☐	☐
Eco-Profil	☐	☐	☐
Energyplus	☐	☐	☐
Radiance	☐	☐	☐
Velux Daylight Visualizer 2	☐	☐	☐
Autre	☐	☐	☐

19. Comment jugez-vous l'utilité des résultats fournis par ces logiciels?

	Sans grandes utilités	Moyennement utiles	Utiles
Dialux	☐	☐	☐
Pleiades+Comfie	☐	☐	☐

Archiwizard	☐	☐	☐
EcoDesigner (plugin Archicad)	☐	☐	☐
Eco-Mod	☐	☐	☐
Eco-Profil	☐	☐	☐
Energyplus	☐	☐	☐
Radiance	☐	☐	☐
Velux Daylight Visualizer 2	☐	☐	☐
Autre	☐	☐	☐

20. Quels types de représentation des résultats vous parlent le mieux?

Pouvez-vous donner une appréciation pour chaque type de représentation.

	Non adaptées	Peu adaptées	Moyennement adaptées	Adaptées
Graphiques (radars, camembert, histogrammes...)	☐	☐	☐	☐
Tableaux de valeurs, plages de valeurs, courbes...	☐	☐	☐	☐
Modèles 3D (vue photo-réaliste, fausses couleur...)	☐	☐	☐	☐

21. Quels types d'interventions ces logiciels vous ont-ils permis de faire?

En utilisant ces logiciels avez-vous fait des interventions sur votre projet, lesquelles?

- ☐ Aucune
☐ Correction sur quelques détails
☐ Correction d'une grande partie du projet
☐ Choix d'une solution architecturale
☐ Réalisation d'une esquisse de votre projet
☐ Autre :

22. Si on vous propose une nouvelle méthode ou un outil d'assistance à la conception dans le but de vous aider à intégrer la lumière naturelle dans vos projets d'architecture, selon vous, cette méthode doit: *

N'hésitez pas à donner vos suggestions.

- ☐ Proposer des idées d'ambiances lumineuses à créer dans vos projets.
☐ Evaluer la quantité de lumière naturelle sans avoir à fournir beaucoup d'informations sur le projet (orientation, dimensions, type de matériaux...).

- ☐ Permettre de décrire (avec un langage architectural: lumière contrastée, tamisée...) la qualité de la lumière naturelle que vous voulez avoir dans votre projet.
- ☐ Utiliser un langage architectural au lieu / avec le langage physique (en Lux, en FLJ...) pour décrire la lumière naturelle.
- ☐ Permettre au concepteur de décrire et d'exprimer (par des dessins, des photos...) ces intentions en matière de lumière naturelle.
- ☐ Interpréter les idées et les intentions en matière d'effets de lumière naturelle que vous voulez avoir dans votre projet et générer des formes architecturales qui permettent de les vérifier.
- ☐ Permettre de faire des itérations (proposer des solutions => les évaluer => les comparer à vos attentes => les modifier et répéter ce cycle jusqu'à arriver à des solutions satisfaisantes).
- ☐ Faire des simulations de la lumière naturelle dès le début de la conception du projet (dès l'esquisse).
- ☐ Autre :

Merci pour votre participation, si vous avez des remarques ou suggestions, vous pouvez les mentionner dans ce champ.

Pour envoyer vos réponses, veuillez cliquer sur le bouton "Envoyer" en bas de cette page.

C'est la dernière étape, les résultats seront envoyés automatiquement au doctorant en cliquant sur le bouton "Envoyer".

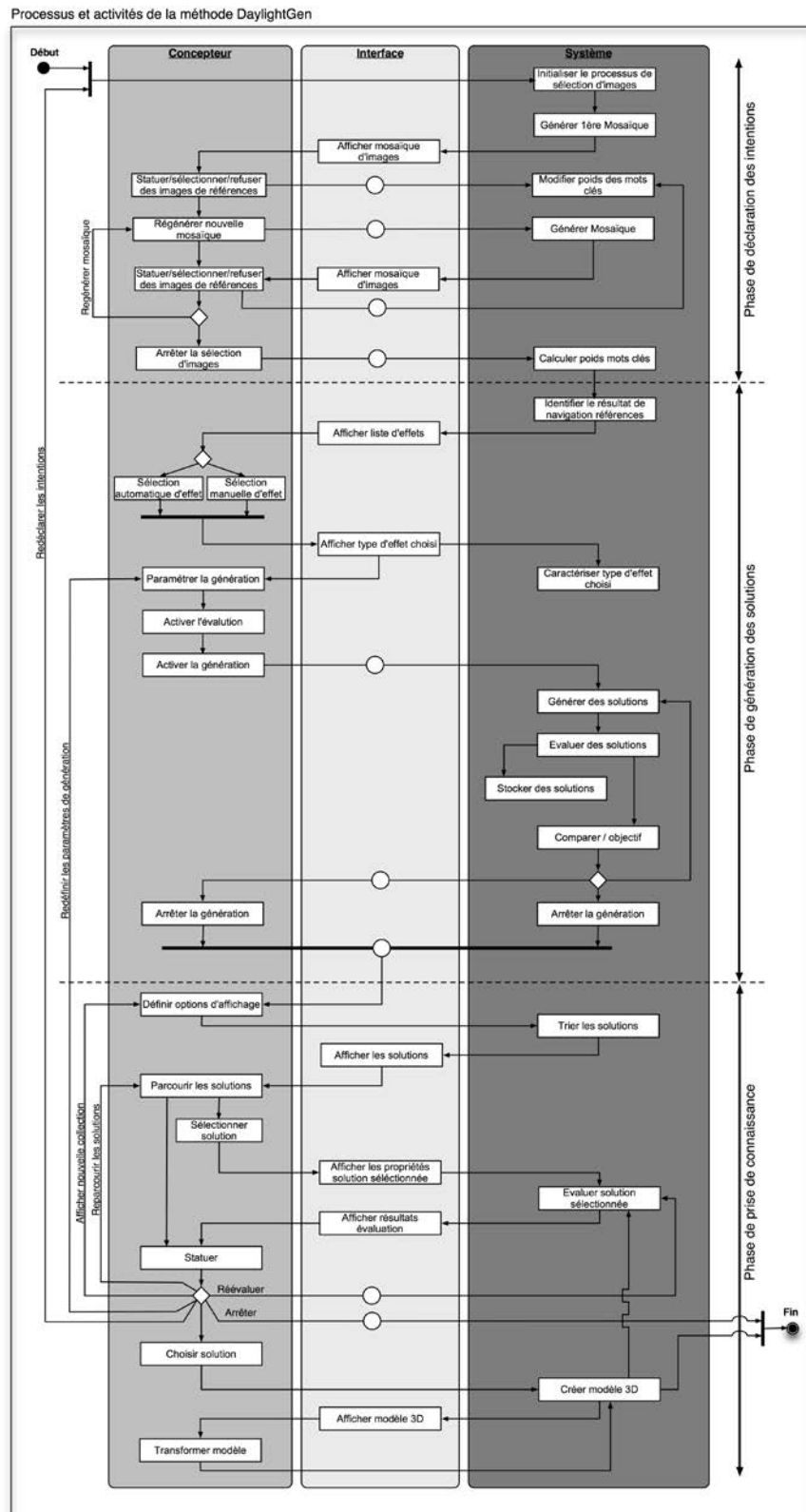
Envoyer

N'envoyez jamais de mots de passe via l'outil Formulaires Google.

Fourni par [Google Documents](#)

[Signaler un cas d'utilisation abusive](#) - [Conditions d'utilisation](#) - [Clauses additionnelles](#)

Annexe 2 : Processus et activités de la méthode *DaylightGen*

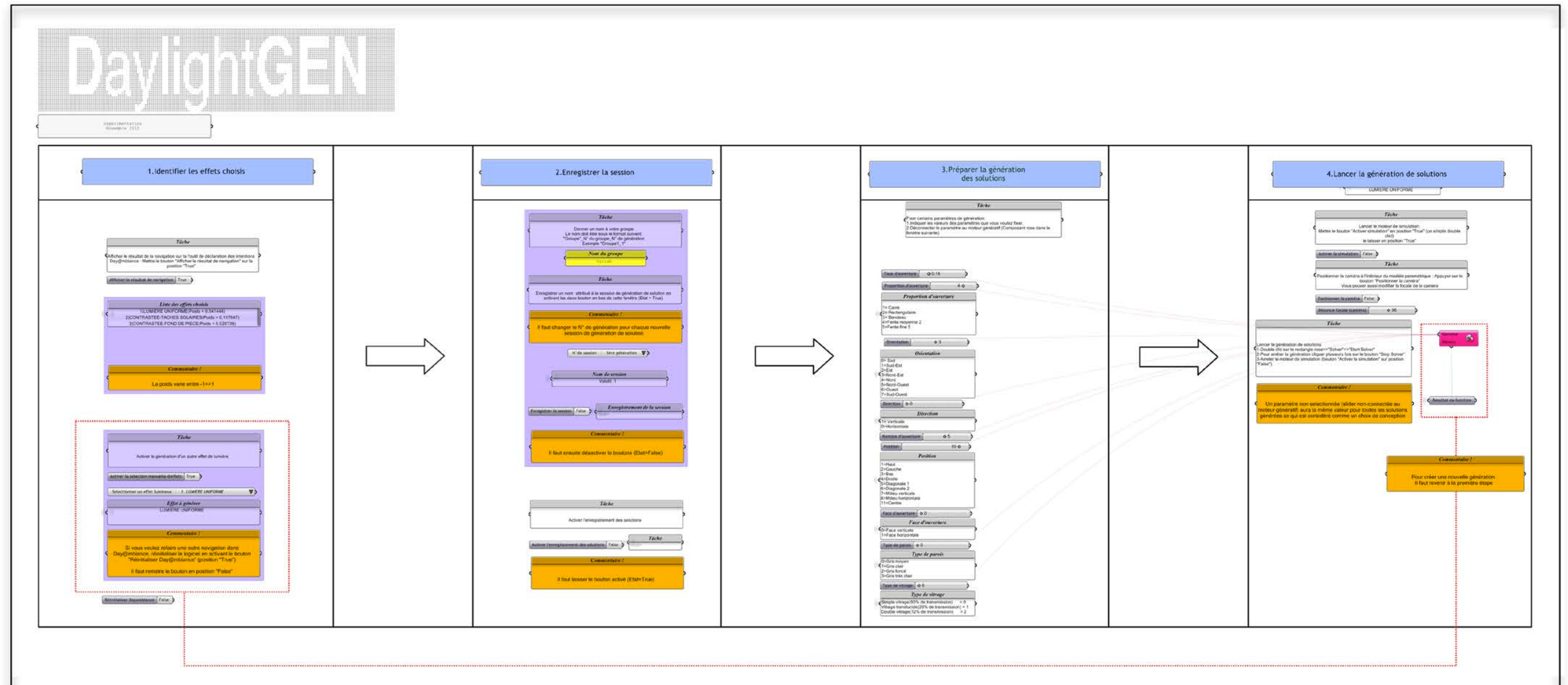


Annexe 3 : Fonctions de caractérisation des types d'effet

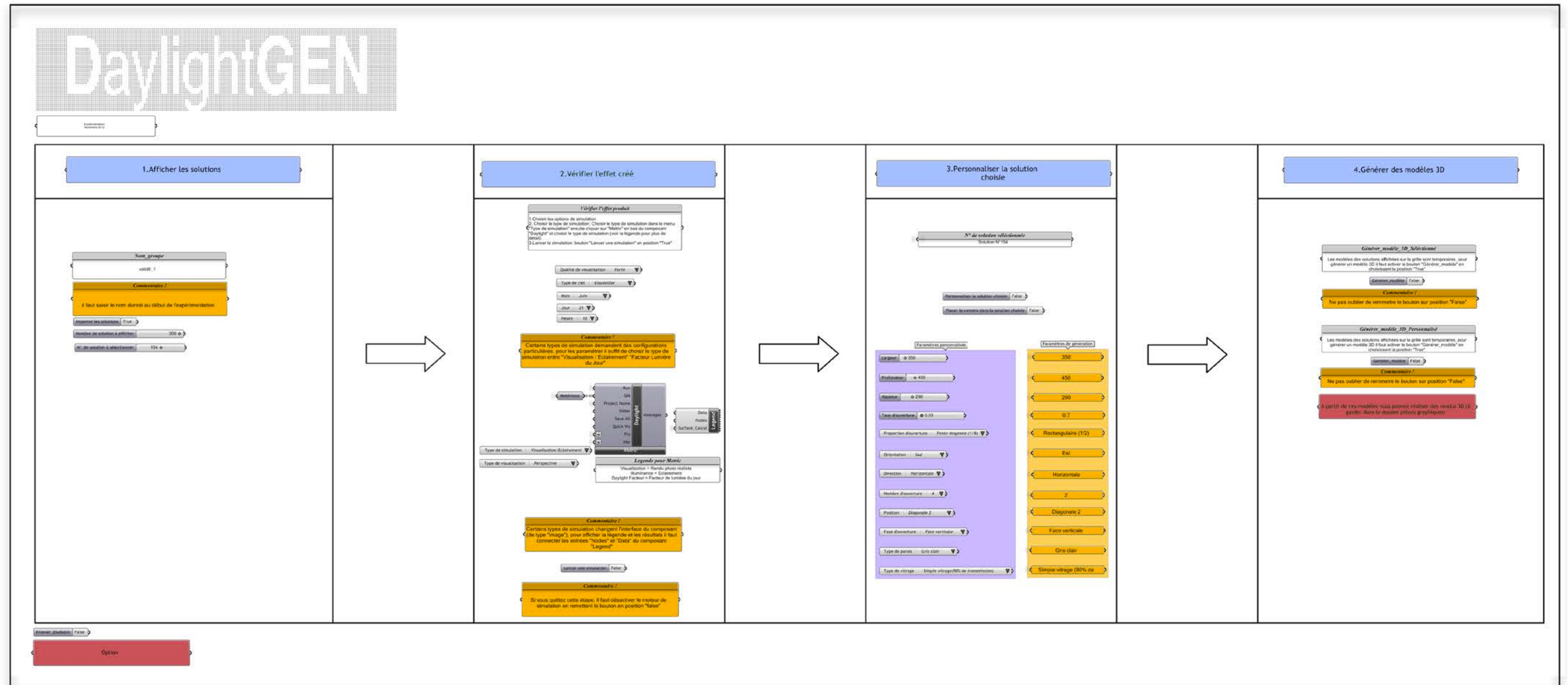
Type d'effet	Indicateur	Fonction
Lumière uniforme	X=écart type des valeurs des apports solaires; Y=moyenne des apports solaires	$f=(\text{Abs}(Y-(3 \cdot X)))+(5 \cdot \text{Abs}(X-30))$
Lumière englobante	X=écart type des valeurs des apports solaires; Y=moyenne des apports solaires	$f=(\text{Abs}(Y-(1.2 \cdot X)))+(10 \cdot \text{Abs}(X-400))$
Lumière rasante	X=écart type des valeurs des apports solaires; Y=moyenne des apports solaires	$f=(\text{Abs}(Y-(1.4 \cdot X)))+(10 \cdot \text{Abs}(X-100))$
Lumière contrastée-Fond de pièce	X=moyenne des apports solaires dans la zone 1 (1/3 surface au sol); Y=moyenne des apports solaires dans la zone 2 (2/3 surface au sol)	$f=(X-Y)$
Lumière contrastée-Clairière	X=nombre de valeurs > 0,8 de la valeur maximale (apports solaires); X=nombre de valeurs > moyenne (apports solaires); Z=indice de répartition des valeurs maximales (apports solaires); U=taux d'ouverture réel	$f=(10 \cdot \text{Abs}(X-2))+(\text{Abs}(Y-32)+Z)+(1000 \cdot U)$
Lumière contrastée-Taches solaires	X=différence entre la moyenne et l'écart type (apports solaires); Y=indice de répartition des valeurs maximales (apports solaires); Z=taux d'ouverture réel; U=valeur maximale d'apport solaire	$f=(\text{Abs}(X))+(100 \cdot \text{Abs}(Y-150))+(1000 \cdot Z)+(\text{Abs}(Y-50))$

Annexe 4 : Interface utilisateur de DaylightBox

Interface utilisateur de DaylightBox



Interface utilisateur de DaylightViewer



Annexe 6 : Retour d'expérience-Expérimentation de *DaylightGen*



Retour d'expérience-Expérimentation de DayLightGen

Ce questionnaire vise à récolter vos remarques et vos suggestions suite à l'utilisation du dispositif d'assistance à la conception DayLightGen.

Je vous prie de bien vouloir répondre aux différentes questions en essayant d'expliquer vos choix et vos remarques (dans les zones dédiées)

Pour valider vos réponses veuillez cliquer sur le bouton "Envoyer" en bas de cette page.

Merci,

En cas de problèmes, envoyer un mail à l'adresse suivante: gallas@crai.archi.fr

***Obligatoire**

Informations générales

Nom *

Prénom *

Formation *

☐ AME

☐ ACC

Utilisation de DayLightGen-Déclaration des intentions

Déclaration des intentions

1. Avant d'utiliser DayLightGen, aviez-vous le sentiment de maîtriser le comportement de la lumière naturelle lors de la conception des esquisses de vos projets? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *

2. Avant d'utiliser DayLightGen, aviez-vous une idée du type de lumière (effet, ambiance) que vous alliez créer pour votre projet ? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *

3. Est-ce que l'utilisation de la mosaïque d'images vous a permis de chercher des idées (intentions) d'ambiances lumineuses ? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *



4. Est-ce que les images issues de cette navigation ont été suffisantes pour identifier les effets de la lumière naturelle à créer dans votre projet? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *



5. Pensez-vous que les d'effets identifiés suite à la sélection des images vous ont permis de décrire vos intentions ? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *



6. Trouvez-vous que l'utilisation d'images référencées est un bon moyen pour déclarer (exprimer) des intentions en rapport avec la lumière naturelle ? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement

☐ Oui

Expliquer votre réponse *

Utilisation de DayLightGen-Génération des solutions

Génération des solutions

7. Est-ce que le paramétrage de la génération a influencé vos choix de conception (connexion des paramètres au moteur de génération des solutions)? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *

8. Est-ce que la navigation dans la grille de solutions a influencé vos choix de conception (vous a donné/ fait modifier des idées)? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *

9. Est-ce que les solutions proposées par DayLightGen sont en correspondance avec vos intentions ? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *

10. Est-ce que les solutions proposées ont orienté vos choix de conception (influencé vos choix) ? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *

11. Est-ce que les solutions proposées vous ont permis d'explorer de nouvelles pistes de conception? *

Des pistes que vous n'avez pas pu imaginer sans l'aide apporté par DayLightGen

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement

☐ Oui

Expliquer votre réponse *

12. Quels types d'évaluations avez-vous appliqué pour vérifier la validité des solutions proposées par la méthode? *

- ☐ Simulations photo-réalistes (rendu)
- ☐ Simulations quantitatives (facteur lumière du jour, niveaux d'éclairements ...)
- ☐ Evaluation de la configuration architecturale (disposition, taille des ouvertures et imagination du résultats...)
- ☐ Rien

Expliquer votre réponse *

13. Est-ce que les résultats de l'évaluation de/des solutions proposées (rendu/simulation) ont influencé vos choix de conception (vos idées/proposition) ? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

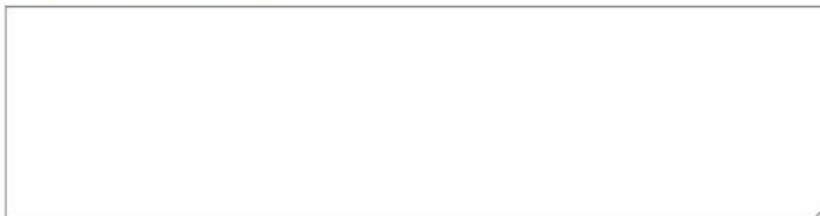
Expliquer votre réponse *

14. Comment qualifieriez-vous la fonction de personnalisation (modification)

des solutions proposées par DayLightGen ? *

- ☐ Sans utilité
- ☐ Moyennement utile
- ☐ Potentiellement utile
- ☐ Très utile

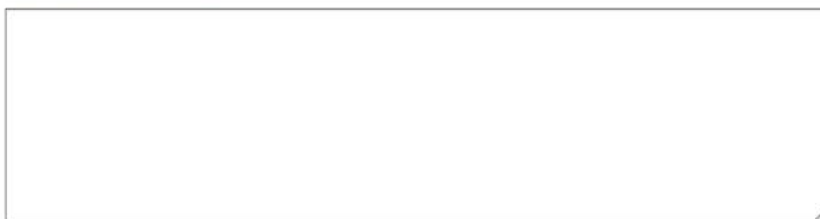
Expliquer votre réponse *



15. Est-ce que cette fonction (personnalisation) vous a permis d'explorer de nouvelles pistes de conception? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *



16. Est-ce que l'utilisation de DayLightGen vous a assuré/apporté une certaine maîtrise de la lumière naturelle dans votre projet (une certaine assurance/confiance) dans vos choix)? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *



17. Avez-vous l'impression de mieux maîtriser l'intégration de la lumière naturelle pendant la phase d'esquisse grâce à l'utilisation de DayLightGen? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *



18. Est-ce que l'utilisation de DayLightGen a influencé votre démarche de conception (méthode de travail) ? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *



19. Est-ce que le type de solutions générées et les différentes fonctions proposées par la méthode vous semble adaptées pour assister le concepteur pendant la phase d'esquisse du projet? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement

☐ Oui

Expliquer votre réponse *

20. Comment qualifieriez-vous l'échange avec DayLightGen dans le cadre d'un exercice de conception? *

- ☐ Inexistant
- ☐ Faible
- ☐ Moyen
- ☐ Intéressant

Expliquer votre réponse *

21. Est-ce que l'esquisse obtenue vous semble présenter une attention particulière à la prise en compte de la lumière naturelle ? *

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *

22. Pensez-vous que vous auriez produit la même esquisse sans utiliser DayLightGen ? *

- ☐ Pas du tout

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *

23. Comment qualifieriez-vous ce prototype d'outil d'assistance (DayLigthGen)? *

- ☐ Sans utilité
- ☐ Moyennement utile
- ☐ Potentiellement utile
- ☐ Très utile

Expliquer votre réponse *

24. Selon vous, est-ce que DayLightGen pourrait être utilisé dans un cadre de conception réel ? *

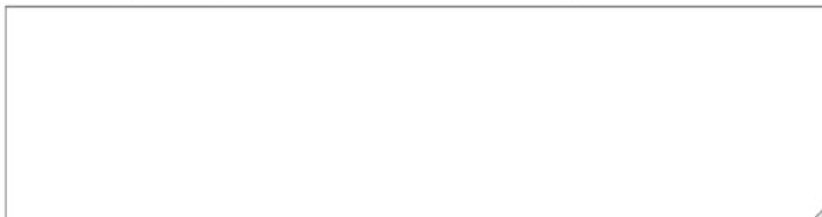
- ☐ Pas du tout
- ☐ Difficilement
- ☐ Potentiellement
- ☐ Oui

Expliquer votre réponse *

25. Si vous avez la possibilité, que modifieriez-vous dans DayLightGen? *



26. Remarques, suggestions, avis suite à cette expérimentation



Merci pour votre participation

Pour valider vos réponses veuillez cliquer sur le bouton "Envoyer" en bas de cette page.
Merci,

Envoyer

N'envoyez jamais de mots de passe via l'outil Formulaires Google.

Fourni par [Google Documents](#)

[Signaler un cas d'utilisation abusive](#) - [Conditions d'utilisation](#) - [Clauses additionnelles](#)