



HAL
open science

Didacticiel pour une meilleure intégration de l'éclairage dans l'enseignement du projet d'architecture

Ljubica Mudri

► To cite this version:

Ljubica Mudri. Didacticiel pour une meilleure intégration de l'éclairage dans l'enseignement du projet d'architecture. [Rapport de recherche] 0893/94, Ecole d'architecture de Paris-Tolbiac; Bureau de la recherche architecturale (BRA). 1994, pp. 89. <hal-03099638>

HAL Id: hal-03099638

<https://hal.science/hal-03099638v1>

Submitted on 6 Jan 2021

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

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



HAL Authorization

14380



3030026120649

ECOLE D'ARCHITECTURE DE
VERSAILLES

équipement, des transports et du tourisme, Direction de
le l'urbanisme, sous-direction des enseignements et des
bureau de la recherche architecturale. / Ecole
d'Architecture Paris-Tolbiac

Lettre de commande N° 88961
du 12 août 1993

Rapport définitif - juillet 1994

Lettre de commande N° 88961 du 12 août 1993

Titre du projet

**Didacticiel pour une meilleure intégration de l'éclairage
dans l'enseignement du projet d'architecture**

mots clés
Architecture, Eclairage naturel, Logique non-classique et IA pour une
nouvelle structuration de la communication dès l'esquisse architecturale

opinions émis par les responsables de la recherche n'engagent que
leurs auteurs."

Projet individuel d'enseignant-chercheur

Ljubica MUDRI

14380

Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme, Direction de
l'architecture et de l'urbanisme, sous-direction des enseignements et des
professions, bureau de la recherche architecturale. / Ecole
d'Architecture Paris-Tolbiac

Lettre de commande N° 88961
du 12 août 1993

Rapport définitif - juillet 1994

Lettre de commande N° 88961 du 12 août 1993

Titre du projet

**Didacticiel pour une meilleure intégration de l'éclairage
dans l'enseignement du projet d'architecture**

mots clés
Architecture, Eclairage naturel, Logique non-classique et IA pour une
nouvelle structuration de la communication dès l'esquisse architecturale
opinions émis par les responsables de la recherche n'engagent que
leurs auteurs."

Projet individuel d'enseignant-chercheur

Ljubica MUDRI

14380

AVANT-PROPOS

628.9

MUD

Bien que ce document soit le rapport définitif d'un projet individuel, il n'aurait pu se réaliser sans des collaborations et soutiens actifs.

Je souhaite à cette occasion remercier le Bureau de la Recherche Architecturale et en particulier Monsieur Jean-Marie HESNIER qui m'a accordé une confiance et

Lettre de commande N° 88961 du 12 août 1993

Je remercie également Monsieur Jean-Pierre Franca qui a bien voulu m'accueillir au sein de l'École d'Architecture Paris-Tolbiac.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Madame Pierrette CHAUVEL du CSTB à Nantes pour ses conseils

"Le présent document constitue le rapport final d'une recherche remise au bureau de la recherche architecturale en exécution du programme général de recherche mené par le Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme avec le Ministère de l'enseignements supérieur et de la recherche. Les jugements et opinions émis par les responsables de la recherche n'engagent que leurs auteurs."

Merci enfin à Madame CHAMPETIERS de RIBES et aux architectes Messieurs Vincent BROSSY, Cuno BRULLMANN, Eric DESPLANCHES, Laurent ISRAEL, Jean-Claude MOREAU, François PELEGRIN, Alain PELISSIER, Jean PHILIPPE, Jacques POCHOY, François POTONET et Philippe VILLIEN qui m'ont consacré leur temps et leur réflexion et sans qui ce travail n'aurait pu aboutir.

14380

DIFFUSION DES RESULTATS

AVANT-PROPOS

Bien que ce document soit le rapport définitif d'un projet individuel, il n'aurait pu se réaliser sans des collaborations et soutiens actifs.

Je souhaite à cette occasion remercier le Bureau de la Recherche Architecturale et en particulier Monsieur Jean-Marie BESNIER qui m'a accordé une confiance et un soutien toujours important dans ce projet.

Je remercie également Monsieur Jean-Pierre Franca qui a bien voulu m'accueillir au sein de l'Ecole d'Architecture Paris-Tolbiac.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Madame Pierrette CHAUVEL du CSTB à Nantes pour ses conseils et sa collaboration sur la première partie du travail sur l'éclairage naturel, à Monsieur Patrice PERNY et Mademoiselle Catherine MICHEL du LAFORIA-IBP Paris 6 pour leur collaboration sur les aspects logiques et informatiques de ce travail et à Monsieur Albert DUPAGNE du LEMA de l'Université de Liège qui m'a permis, au sein de son laboratoire, d'effectuer des vérifications numériques par des simulations

Merci enfin à Madame CHAMPETIERS de RIBES et aux architectes Messieurs Vincent BROSSY, Cuno BRULLMANN, Eric DESPLANCHES, Laurent ISRAEL, Jean-Claude MOREAU, François PELEGRIN, Alain PELISSIER, Jean PHILIPPE, Jacques. POCHOY, François POTONET et Philippe VILLIEN qui m'ont consacré leur temps et leur réflexion et sans qui ce travail n'aurait pu aboutir.

DIFFUSION DES RÉSULTATS

SOMMAIRE

Outre le présent rapport, les aspects marquants de ce travail ont été acceptés pour présentation et publication dans deux congrès internationaux :

1. Introduction.....	1
2. Contexte.....	4
En ce qui concerne les aspects intelligence artificielle et design :	
3. Concevoir un objet architectural.....	8
Congrès AID'94, Août 94, Lausanne	
3.1. Une approche à l'aide de modèles flous de support de design architectural par L. MUDRI, P. PERNY, P. CHAUVEL.....	9
3.2. L'ÉTUDE DE CE QUE NOUS CONSIDÉREONS UNE ESQUISSE.....	10
3.3. QU'EST-CE QU'UNE CONTRAINTE POUR L'ARCHITECTE ?.....	11
3.4. ÉTUDE DES TRANSFORMATIONS DE L'OBJET ARCHITECTURAL.....	11
En ce qui concerne les questions de structure de critères en éclairage naturel et les aspects didactiques :	
3.4.1. Notre approche.....	13
3.4.2. Conclusion des interviews.....	14
European conference on energy performance and indoor climate in buildings, Novembre 1994, Lyon	
4. Matrice d'indices lumineuse en éclairage naturel.....	18
A dynamic structure of criteria in daylighting and energy to support the teaching in architectural design par L. MUDRI	
4.1. CLASSIQUE DE LA QUALITÉ DE L'ÉCLAIRAGE.....	19
4.2. NOTRE APPROCHE.....	19
4.2.1. La structure d'indices en état de base.....	20
4.2.2. Les structures d'indices spécifiques.....	22

4.3	PRESENTATION DES INDICES	26
4.3.1	Indice d'exposition.....	26
4.3.1.1	Règle d'exposition.....	26
4.3.1.2	SOMMAIRE des ensembles flous dans la règle d'exposition.....	27
4.3.2	Indice d'obstruction.....	28
4.3.2.1	Règle d'obstruction.....	28
4.3.2.2	Représentation des ensembles flous dans la règle d'obstruction.....	29
4.3.3	Indice de salissement.....	30
4.3.3.1	Règle de salissement.....	30
4.3.3.2	Représentation de l'appartenance dans la règle de salissement.....	30
4.3.4	Indice de contexte.....	31
4.3.4.1	Règle de la réflexion du contexte.....	31
4.3.4.2	Représentation des ensembles flous dans la règle de réflexion du contexte.....	31
4.3.5	Indice d'environnement.....	32
4.3.6	Structure d'objets relatives à l'indice.....	32
1.	Introduction.....	1
2.	Contexte.....	4
3.	Concevoir un objet architectural.....	8
3.1.	LES CARACTÉRISTIQUES DE LA CONCEPTION ARCHITECTURALE.....	9
3.2.	DEFINITION DE CE QUE NOUS CONSIDERONS UNE ESQUISSE	10
3.3.	QU'EST-CE QU'UNE CONTRAINTE POUR L'ARCHITECTE ?.....	11
3.4.	ETUDE DES TRANSFORMATIONS DE L'OBJET ARCHITECTURAL	11
3.4.1.	Le modèle du processus de la conception.....	12
3.4.2.	Notre approche.....	13
3.4.3.	Conclusion des interviews.....	14
4.	Maîtriser l'ambiance lumineuse en éclairage naturel	18
4.5.	D'OU VIENNENT LES CONNAISSANCES ?.....	37
4.1.	EVALUATION CLASSIQUE DE LA QUALITÉ DE L'ÉCLAIRAGE.....	19
4.2.	NOTRE APPROCHE	19
4.2.1.	La structure d'indices en état de base.....	20
4.2.2.	Les structures d'indices spécifiques.....	22

4.3 PRESENTATION DES INDICES	26
4.3.1 Indice d'exposition.....	26
4.3.1.1 Règle d'exposition.....	26
4.3.1.2 Représentation des ensembles flous dans la règle d'exposition.....	27
4.3.2 Indice d'obstruction.....	28
4.3.2.1 Règle d'obstruction.....	28
4.3.2.2 Représentation des ensembles flous dans la règle d'obstruction.....	29
4.3.3 Indice de salissement.....	30
4.3.3.1 Règle de salissement.....	30
4.3.3.2 Représentation de l'appartenance dans la règle de salissement.....	30
4.3.4 Indice de réflexion du contexte.....	31
4.3.4.1 Règle de la réflexion du contexte.....	31
4.3.4.2 Représentation des ensembles flous dans la règle du contexte.....	31
4.3.5 Indice d'environnement.....	32
4.3.5.1 Règle d'environnement.....	32
4.3.6 Structure d'objets relatives à l'indice d'environnement.....	32
4.3.6.1 Partie spécifique des données relatives à l'indice d'environnement.....	33
4.4 D'OU VIENNENT LES DONNÉES ?.....	36
4.5 D'OU VIENNENT LES CONNAISSANCES ?.....	37

5. Modéliser et évaluer les objets architecturaux au moyen des ensembles flous et de la logique multivaluée.....	3 8
5.1 COMPARAISON DES ENSEMBLES CLASSIQUES ET FLOUS.....	3 8
5.2 MODELISER LES OBJECTIFS DE L'ARCHITECTE AVEC DES ENSEMBLES FLOUES	4 0
5.3 REPRESENTATION APROXIMATIVE DES OBJETS ARCHITECTURAUX AVEC DES DISTRIBUTION DES POSSIBILITE.....	4 3
5.4 DEFINITION ET AGREGATION DES NIVEAUX DE COMPATIBILITÉ CONSEQUENCE/OBJECTIFS	4 4
5.5 LES PROPOSITIONS FLOUES ET LEURS TRAITEMENTS THÉORIQUES À L'AIDE DU MODUS PONENS GÉNÉRALISÉ.....	4 6
Conclusion.....	5 3
Bibliographie.....	5 4
Annexes.....	5 5

Ces "connaissances techniques" représentent-elles une réalité indépendante de l'architecture comme création artistique?

Tout d'abord, la façon dont un faisceau lumineux sera reçu et réparti dans un espace intérieur peut être considérée comme un choix artistique de l'architecte, or ce choix détermine naturellement un concept technique d'éclairage (et de thermique). Dans la réalité de la conception, il n'est pas question de "créer l'architecture" puis de réfléchir à la question des "concepts techniques". En fait, c'est l'architecte qui, par son appréhension synthétique du projet, doit apporter la solution la plus judicieuse à l'ensemble des contraintes.

Ensuite, les choix, les concepts fondamentaux, sont décidés dans la phase d'esquisse architecturale. Une esquisse est une image de l'objet architectural représenté de manière imprécise et incomplète. C'est à cause de cette imprécision et de cette incomplétude des

Didacticiel pour une meilleure intégration de l'éclairage dans l'enseignement du projet d'architecture

Le cas de l'ambiance lumineuse en éclairage naturel

1 Introduction

Depuis les premières cavernes percées d'une ouverture au travers de laquelle a pénétré un faisceau d'énergie solaire apportant lumière et chaleur, les concepts de l'éclairage naturel de l'espace intérieur ont beaucoup varié en fonction des données climatiques, socioculturelles, psychologiques, économiques, politiques, etc... Les approches conceptuelles ont été d'abord plutôt intuitives et qualitatives (ou parfois ignorées). C'est d'abord avec la crise énergétique mais aussi de nos jours que la question de l'énergie (qui influe considérablement sur la question de l'éclairage naturel) est véritablement devenue une contrainte de plus dans la conception du bâtiment et que cette contrainte forte a rendu les problèmes traités par la physique du bâtiment plus aigus. C'est alors que l'approche quantitative a été favorisée. De plus, la présence quotidienne des outils informatiques a renforcé le développement et l'application des méthodes quantitatives dans la problématique de l'éclairage naturel. Les approches quantitatives sont basées sur des méthodes mathématiques qui utilisent des données précises et complètes sur le projet de bâtiment examiné et qui donnent des résultats précis. Ces approches enrichissent "les connaissances techniques" sur le bâtiment.

Ces "connaissances techniques" représentent-elles une réalité indépendante de l'architecture comme création artistique?

Tout d'abord, la façon dont un faisceau lumineux sera reçu et réparti dans un espace intérieur peut être considérée comme un choix artistique de l'architecte, or ce choix détermine naturellement un concept technique d'éclairage (et de thermique). Dans la réalité de la conception, il n'est pas question de "créer l'architecture" puis de réfléchir à la question des "concepts techniques". En fait, c'est l'architecte qui, par son appréhension synthétique du projet, doit apporter la solution la plus judicieuse à l'ensemble des contraintes.

Ensuite, les choix, les concepts fondamentaux, sont décidés dans la phase d'esquisse architecturale. Une esquisse est une image de l'objet architectural représenté de manière imprécise et incomplète. C'est à cause de cette imprécision et de cette incomplétude des

données que les méthodes quantitatives ne sont pas applicables à ce stade de la conception.

Notre objectif est d'établir le pont nécessaire entre approche quantitative et approche qualitative pour l'éclairage naturel durant la phase de conception dans laquelle les données sont imprécises et incomplètes, c'est à dire de faciliter les inter-relations entre activité artistique et activité de planification de l'ambiance lumineuse dès la phase d'esquisse pour permettre à l'étudiant en architecture de maîtriser mieux les conséquences techniques de ses intentions architecturales et de son choix du concept. Cela facilitera sa recherche du confort d'une ambiance lumineuse adaptée à la fonction de l'espace, en maîtrisant les risques d'inconfort, l'aidera à faire la synthèse indispensable entre l'enseignement de l'art et l'enseignement des techniques durant ses études et facilitera la formation de ces propres critères (son propre point de vue) pour l'ambiance lumineuse.

Méthodes

Dans la poursuite de cet objectif, nous avons abordé un certain nombre de questions d'ordres méthodologique et théorique que nous présentons ici.

Tout d'abord, afin de mieux comprendre l'évolution de l'objet architectural en explorant particulièrement sa nature imprécise et incertaine, donc pour détecter certaines caractéristiques communes dans l'évolution en dépit de la grande variété des processus de conception, nous avons choisi d'interviewer différents architectes.

Nous avons ensuite étudié les méthodes existantes en éclairage naturel. Il apparaît clairement qu'elles ne sont pas adaptées à la phase de conception architecturale. Nous avons alors analysé les relations entre : la connaissance relative au phénomène de l'éclairage naturel et l'objet physique du bâtiment concerné par cette connaissance (en tenant compte de la nature évolutive de l'objet architectural dans la conception).

Enfin, pour pouvoir formaliser les relations entre les connaissances en éclairage et l'objet architectural durant son évolution, nous avons étudié différentes méthodes mathématiques. La logique des ensembles flous (qui admet la manipulation des données avec différents degrés de précision) et les logiques multivalentes nous ont paru adaptées, et, pour pouvoir présenter et tester notre approche une maquette informatique est en cours de création.

Résultats

Les résultats des interviews nous ont donné plus de précision sur la façon dont il serait souhaitable de formaliser et structurer des connaissances pour rester cohérent avec la dynamique de la conception. Nous avons construit une structure arborescente de critères pour aider la conception de l'ambiance lumineuse en éclairage naturel. Cette structure permet une évaluation progressive de l'ambiance afin de suivre la démarche de la conception. Elle est évolutive et modulaire ce qui permet l'intégration de nouveaux points de vues, de nouveaux critères et de leurs agrégations.

Pour pouvoir prendre en compte l'aspect imprécis et incomplet des données disponibles dans la phase d'esquisse, nous avons proposé un modèle de bâtiment (pour le point de vue de l'éclairage naturel) exprimé en termes de sous-ensembles flous. La logique des sous-ensemble flous, les logiques multivalentes et la programmation orientée-objet sont les méthodes mathématiques que nous avons utilisées pour modéliser le bâtiment en tant qu'objet physique, mais également les méthodes en éclairage naturel et la dynamique de la conception en esquisse en tant que connaissances.

Remarque

Cette approche intègre un grand nombre de questions sociologiques, économiques, esthétiques.... Nous nous sommes consciemment restreints et nous nous intéressons dans ce travail essentiellement à la notion d'ambiance, à l'éclairage naturel. Notre objectif est de montrer comment les connaissances expertes peuvent être formalisées et structurées afin d'être utiles à l'architecte dans la phase de conception. Nous souhaitons mettre en place une procédure d'évaluation interactive du projet en exploitant les informations graphiques et linguistiques déduites de la phase d'esquisse (toutefois, dans ce travail, l'élaboration de la base de données graphiques n'est pas considérée; celle-ci est supposée disponible)¹.

¹L'élaboration d'une telle base suppose deux études distinctes. Une première considère le problème de la reconnaissance des objets physiques du bâtiment à partir d'une esquisse. Par exemple, le travail de Louis-Paul Untersteller (EAPLV, Paris) intitulé "Reconnaissance de Croquis perspectifs à main levée" (voir rapport de juillet 94 au BRA) considère ce type de problème. La deuxième étude est relative aux problèmes de nomenclature, classification et structuration des données du bâtiment. Des nombreuses

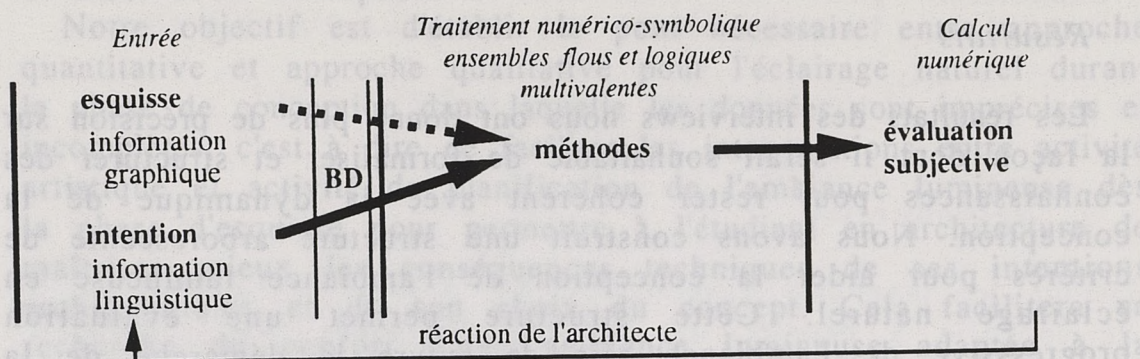


Fig. 1.1 Schéma d'une conception évolutive et rétroactive

2 Contexte

Ce travail se situe à l'intersection de plusieurs domaines : conception architecturale, éclairage naturel et informatique. En effet, il utilise les ressources de l'informatique pour aider la conception de l'architecte sur le thème de l'éclairage naturel.

En conception architecturale, les travaux de recherche récents suivent différentes directions : certains dont les préoccupations sont tournées vers des questions épistémologiques étudient le processus de conception lui-même (Boudon, 1991, 1992 et Farel, 1991); d'autres ont une approche plus proche des sciences humaines (on pourra se reporter à Conan, 1990 et Heath, 1993) certains enfin, se concentrent surtout sur l'objet architectural lui-même (voir Hanrot, 1989 et divers travaux collectifs comme le projet COMBINE¹). Pour notre part, bien que chacun de ces grands thèmes entretienne des relations fortes avec les autres, nous nous situons prioritairement dans le champ d'analyse de l'objet architectural. En effet, il est indispensable de comprendre comment l'objet architectural évolue dans la dynamique de la conception afin d'introduire les connaissances d'experts en éclairage naturel d'une façon progressive et pertinente.

équipes du monde de la construction sont confrontées à ce problème. Comme exemple nous pouvons citer le travail du groupe GE4/CN4 "Etude comparative de modèle conceptuels de données pour le bâtiment - Eléments en vue de la définition d'un modèle de référence", Normalisation Française Z 68-370, Fascicule de documentation AFNOR. Le problème d'analyse des données relatives à l'esquisse n'est pratiquement pas encore étudié

¹Computer Models for the building INdustry in Europe, DGXIII - JOULE, partie concernée: le modèle de données intégré développé au CSTB (Sophia Antipolis).

Dans le domaine d'expertise de l'éclairage naturel, hormis les "classiques" (Lam, 1986) et (Hopkinson, 1963) qui traitent à la fois des aspects qualitatifs et quantitatifs, la majorité des travaux de recherche traite de problèmes à caractère essentiellement quantitatif (comme par exemple les travaux de simulation au CSTB¹, à l'ENTPE², au LCPC³, au CERMA⁴ et à l'Ecole d'Architecture de Nancy⁵). Cependant d'autres travaux s'intéressent de plus près aux aspects qualitatifs de l'ambiance lumineuse (en gardant toutefois certains liens avec des caractéristiques quantitatives). On peut par exemple se reporter aux articles de (Iwata, 1991), (Roll, 1987) ou (Sato, 1987) ou encore aux travaux en cours à l'Ecole d'Architecture de Marseille⁶. Cependant, il ne semble pas que quoi que se soit ait été publié sur un système opérationnel permettant une évaluation de l'ambiance lumineuse dans la phase d'esquisse architecturale du point de vue qualitatif. Nous nous situons précisément dans ce champ de recherche et nous étudions comment construire un système permettant cette évaluation.

Cette situation engendre un certain nombre de contraintes quant aux méthodes utilisées pour le développement de notre système. En effet, un certain nombre d'aspects nécessite des traitements particuliers et des techniques mathématiques et informatiques adaptées : le caractère qualitatif de l'appréciation, la notion d'imprécision dans l'esquisse... Parmi le très large éventail de techniques et modèles disponibles dont il serait vain de vouloir faire le tour ici, nous avons retenu la programmation orientée-objet, la logique des sous-ensembles flous et les logiques multivalentes que nous utilisons à la fois comme moyen de modélisation et de déduction (modus ponens et agrégation des sous-ensembles flous). Le choix de la logique des sous-ensembles flous s'appuie sur les nombreux travaux de recherche dans ce domaine (voir ZADEH, 1978 et 1986 pour une vue complète) qui

¹P. TELLIER, "Synthèse d'images réalistes, simulation d'éclairage intérieur et extérieur mixte (naturel et artificiel)", CSTB, 1993.

²Une méthode de visualisation en éclairage intérieur est actuellement en cours d'élaboration par Messieurs MITANCHEY et FONTOYNONT.

³un groupe de recherches travaille sur le programme de visualisation LISE pour l'éclairage urbain.

⁴un logiciel d'ensoleillement a été mis au point et un logiciel de simulation aérodynamique sont utilisés dans le cadre d'un DEA.

⁵Un logiciel d'éclairage nocturne est en cours de réalisation.

⁶L'élaboration d'un logiciel de modélisation du projet est en cours; seront pris en compte l'éclairage et la réponse des matériaux de construction au flux lumineux(Gamsau)

montrent la capacité de cette technique à prendre en compte la notion d'imprécision.

De plus, la programmation orientée-objet est une méthode reconnue qui facilite la manipulation des objets et des relations entre eux (elle est même véritablement conçue pour la notion de structure d'objets).

En ce qui concerne l'approche qualitative, les méthodes de représentation symbolique des connaissances sont particulièrement adaptées. On peut noter, parmi les travaux publiés, deux projets de recherche sur la représentation descriptive des connaissances dans la conception architecturale, les projets AMACH¹ et TECTON². Toutefois, ces projets, qui tous utilisent des logiques classiques binaires, ne nous semblent pas capables de traiter la notion d'imprécision et ne peuvent donc s'adapter à l'esquisse architecturale où se passe la véritable conception.

En outre, un autre aspect important pour ce travail doit être gardé à l'esprit : le caractère didactique du système que nous envisageons. Un didacticiel basé sur la représentation symbolique des connaissances d'experts permet que la communication entre l'étudiant et le didacticiel concerne directement le projet que l'étudiant est en train d'élaborer et non pas un cas général ou un cas type.

Un didacticiel basé sur la représentation symbolique des connaissances est en cours de réalisation à l'école d'architecture de Toulouse : "Un outil d'aide à l'enseignement du projet" Ce projet propose des types d'exercice qui devraient se situer "à la convergence de trois objectifs: - Vérifier le respect des contraintes spécifiques du projet et celles fixées par l'enseignant, - Intégrer directement les savoirs acquis dans les diverses disciplines, - Mieux observer et par conséquent mieux connaître sa propre démarche". Ces contraintes sont liées aux champs: "- Implantation dans le site, - Thermique réglementaire, - Confort thermique d'été, - Coût global."³. Ce didacticiel est conçu en logique du premier ordre, et ne peut donc, à notre avis, pas manipuler des informations imprécises.

¹L. ADOLPHE, L. MUDRI, & al., 1992, "Le projet AMACH, approche multi-acteurs du confort dans l'habitat", rapport final ADEME, Paris.

²S. HANROT, "Modélisation de la connaissance architecturale pour un outil de CAO intelligent", Plan Construction et Architecture, 1989.

³P. FERNANDEZ, "Intégration des contraintes énergétiques dans le processus de conception architecturale", Ecole d'architecture de Toulouse, 1993.

En outre, nous avons étudié les possibilités offertes par le didacticiel "Strategy" de l'Université à Liège. "Le projet Strategy vise à rapprocher les aspects complémentaires des concepts utilisés dans les deux cours d'architecture et de thermique du bâtiment en démontrant aux étudiants qu'ils manipulent les caractéristiques des mêmes éléments architecturaux, mais étudiées sous des angles différents [...] Afin de permettre une exploitation immédiate de l'outil, même dans le cas d'un novice qui ne connaît que quelques concepts nécessaires à son utilisation générale, le programme s'ouvre sur une description complète d'un modèle architectural cohérent. Par défaut, il contient le modèle de maison unifamiliale belge moyenne. [...] Pour modifier ce modèle de base, diverses options sont proposées..."¹.

Le problème sémantique, enfin, est implicite dans tous les domaines que nous avons évoqués. Il est particulièrement apparent dans la modélisation des connaissances (y compris dans la définition de la structure d'objets) car c'est là que les langages de l'architecte et de l'ingénieur doivent trouver une compatibilité. La question est, en fait, la suivante : En quels termes décrire une ambiance lumineuse ? Dans notre démarche de rapprochement des points de vue quantitatifs et qualitatifs, le problème sémantique est apparu au moment de l'association à un certain nombre "d'objets quantitatifs" d'un "terme qualitatif" dont la signification devait désigner l'ambiance lumineuse créée par les "objets quantitatifs" considérés. Par exemple, en ce qui concerne le dynamisme de l'ambiance lumineuse (terme qualitatif), celui-ci s'exprime sur une échelle qualitative (dramatique, plutôt dynamique, plutôt calme, calme, triste) mais réfère à des objets quantitatifs qui sont la répartition globale de la lumière dans l'espace, l'indice de contraste des luminances et les conditions extérieures.

Dans ce cadre, nous allons présenter dans ce qui suit une étude liée à l'évolution de l'objet architectural (section 3), une méthode d'évaluation progressive de l'ambiance lumineuse (section 4), et enfin une méthode mathématique pour décrire et évaluer les objets architecturaux en esquisse (section 5)

¹P. LECLERCQ, "Méthodologie de conception en thermique du bâtiment", Rencontres pédagogiques "enseignement de l'architecture et maîtrise des ambiances", Ministère de l'équipement, Paris 25-26 Mars 1993.

3. Concevoir un objet architectural

"L'empereur de Chine rapporte Italo Calvino, avait commandé le dessin d'un crabe à un artiste, lequel avait posé comme condition de pouvoir disposer, pour ce faire, d'une villa pendant un an, accompagnée de six serviteurs. Au bout d'un an, l'empereur demanda où était le crabe. L'artiste répondit qu'il avait besoin de six mois supplémentaires, toujours dans les mêmes conditions. Perplexe, l'empereur, après une forte hésitation, finit par accepter. "Où est mon crabe?", dit à nouveau l'empereur au terme de cette période. Il n'y avait toujours pas de crabe. L'artiste pris alors un feuille : en cinq minutes il dessina le plus beau crabe que l'on ait jamais vu.

La conception -- si du moins l'on pense que "conception" il y a dans cet exemple -- aura-t-elle duré un an et demi ou aura-t-elle duré cinq minutes? Ne se limiterait-elle pas tout aussi bien aux quelques secondes de concentration préalable à ces cinq minutes? Mais encore, l'artiste n'avait-il pas d'abord "conçu" l'idée que la villa et serviteurs lui étaient nécessaires pour l'accomplissement de la tâche? Dans le fond sont condensées dans cette histoire, racontée par un écrivain, donc un "concepteur" diverses approches possibles de la conception¹

¹Ce passage est tiré de "Conception de la conception", p71, de Philippe Boudon (in Les cahiers de la recherche architecturale, n° 34-Concevoir), Ed Parenthèses, 1993

3.1 LES CARACTÉRISTIQUES DE LA CONCEPTION ARCHITECTURALE

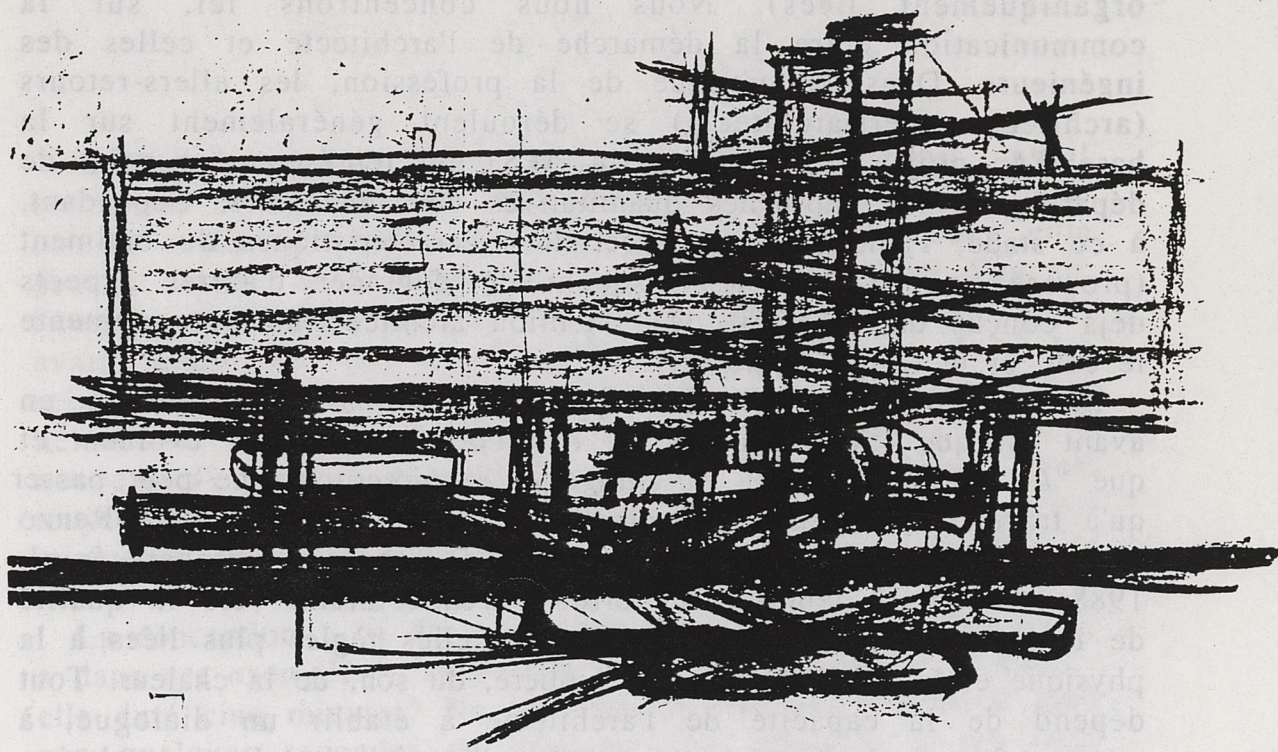
La première caractéristique importante de la conception architecturale est la *multiplicité des compétences* nécessaires: ce processus intègre une démarche de planification liée aux différentes sciences du bâtiment et une démarche artistique (qui, bien que distinctes dans l'analyse, sont, dans la pratique, organiquement liées). Nous nous concentrons ici, sur la communication entre la démarche de l'architecte et celles des ingénieurs. Dans la pratique de la profession, les allers-retours (architecte-expert-architecte) se déroulent généralement sur la base d'un projet bien avancé (fin APS) qui représente un point de départ pour les approches quantitatives des ingénieurs. Cependant, à ce stade, l'amélioration de certaines caractéristiques du bâtiment (proposée par l'ingénieur) risquent de dégrader d'autres aspects déjà conçus dans l'esprit de l'intention architecturale (et augmente le coût et le temps de travail).

La seconde caractéristique que nous souhaiterions mettre en avant est que les connaissances, le mode de vie, etc.. évoluent et que "*Le renouvellement du langage architecturale ne peut passer qu'à travers la connaissance scientifique...*" comme l'a déclaré Renzo Piano (1986), et que les développements techniques (Robert & al, 1988) tendent à déplacer les efforts architecturaux vers la qualité de l'espace et son adaptation à de nouvelles règles plus liées à la physique et la symbolique de la lumière, du son, de la chaleur. Tout dépend de la capacité de l'architecte à établir un dialogue, à comprendre et à prendre en compte l'impact de chaque solution possible et à faire la synthèse de la forme (Dupagne, 1989) la plus judicieuse. Ce point comprend de nombreux aspects liés à la communication entre l'architecte et les autres intervenants dans le projet. Il tend à être partiellement facilité par l'E.D.I. (Échange des Données Informatisées). Néanmoins, durant la phase amont de la conception, l'architecte a besoin de réponses rapides (en temps réel) qui ne peuvent en général pas être données par des experts; habituellement, il ne peut, pour des raisons financières évidentes, disposer d'une équipe d'experts toujours présents à ses côtés (on ne prend pas ici en considération les projets particuliers disposant de budgets très importants ou quasi-illimités).

La troisième caractéristique est que la conception architecturale fait une *utilisation particulière de l'image*. L'image n'est pas seulement une représentation de la solution déjà trouvée, c'est avant tout un élément de la construction mentale de l'architecte. Le processus qui transforme une image mentale en une image matérialisée consiste en une série de métamorphoses. Il est donc

naturel qu'un système d'aide à l'architecte reçoive ses informations, entre autres, des dessins de l'architecte. Toutefois, comme nous le verrons dans l'analyse du processus de la conception architecturale, les images sont plutôt incertaines et imprécises dans les phases amonts et ne deviennent certaines et précises que dans les phases finales de la conception.

3.2 DÉFINITION DE CE QUE NOUS CONSIDÉRONS UNE ESQUISSE



Une esquisse est une image matérialisée de l'objet architectural représenté d'une manière imprécise et incomplète. L'exemple ci-dessus¹ a été choisi pour montrer un des niveaux de précision possibles du projet. Nous avons structuré les méthodes d'experts afin d'évaluer la qualité de l'ambiance à partir de ce type de dessin et des préférences de l'architecte (explicitées littéralement). Ce type de dessin est caractéristique de ce que nous appelons la phase d'esquisse même si d'autres architectes préféreront l'appeler pré-esquisse, schéma, croquis... Dans tous les cas, la caractéristique la plus importante pour cette recherche est le niveau d'imprécision.

¹Esquisse de M. ANDRAULT et P. PARAT tirée de *Le dessin et l'architecte*. Les éditions du demi-cercle, Paris, 1992.

3.3. QU'EST-CE QUE UNE CONTRAINTE POUR L'ARCHITECTE ?

Le bâtiment est situé dans un ancien noyau urbain, c'est une donnée du programme et c'est une contrainte pour l'architecte.

Une surface de travail doit recevoir entre 300 et 500 lux, c'est une norme et c'est une contrainte pour l'architecte.

Plus la localisation du bâtiment est dans une région Sud et plus l'orientation des vitres est vers le Sud et plus l'inclinaison des vitres est petite alors plus l'exposition des espaces intérieurs à la lumière naturelle est importante, c'est une règle d'expert et c'est une contrainte pour l'architecte.

Le bâtiment qui ne touche pas la terre, si c'est un rêve de l'architecte, ça devient une contrainte pour cet architecte.

Si l'architecte n'a pas de rêve, le bâtiment n'a pas d'âme. Mais s'il ne respecte pas les contraintes physiques et s'il ne sait pas interpréter son rêve aussi dans le langage des contraintes physiques, son rêve ne trouvera pas de matérialisation.

3.4. ETUDE DES TRANSFORMATIONS DE L'OBJET ARCHITECTURAL

La description de l'évolution de l'objet architectural est nécessaire pour comprendre comment les connaissances (sous forme de règles) liées à l'éclairage naturel d'une part, et aux objets du bâtiment d'autre part, peuvent être structurées et organisées (Mudri, 1991). Prenons l'exemple d'une règle d'expert en logique du premier ordre :

Si l'angle d'obstruction de la fenêtre est $\leq 32^\circ$ et

la position du site est France Sud et

l'orientation de la fenêtre est Sud et

l'indice de vitrage corrigé est $> 1/6$

Alors l'indice d'éclairage naturel est très favorable

Cette règle ne peut être déclenchée que quand les quatre prémisses sont connues. Mais, dans la plupart des cas en conception, la position du site et l'orientation sont connues dès les premières esquisses, alors que l'angle d'obstruction est connu plus tard et l'indice de vitrage corrigé encore plus tard. Cette règle ne peut donc être utilisée que très tard. Notre approche se veut plus naturellement liée à la conception. Nous souhaitons définir des règles qui utilisent des objets déterminés à peu près au même

moment. En fait, comme l'entrée d'informations est progressive, nous estimons que la sortie doit l'être également. La règle précitée peut, dans cette optique, être transformée en : *Si la position du site est France Sud et l'orientation de la fenêtre est Sud alors l'indice d'exposition est grand*; et seulement ensuite, l'angle d'obstruction et l'indice de vitrage corrigé peuvent être introduits progressivement.

L'objectif de cette phase est donc la description de l'évolution de "l'image matérialisée" (Oxman, et al.,1987) dans la conception. Plus précisément, il faut déterminer en quels termes on peut exprimer l'évolution de la conception de l'objet architectural et comment évolue l'imprécision des objets architecturaux (évolue-t-elle de la même façon pour tous les objets ou non?).

3.4.1 Le modèle du processus de la conception

Tout d'abord nous présentons une instance du schéma des étapes de la conception qui est constituée de deux éléments: l'activité et l'état.

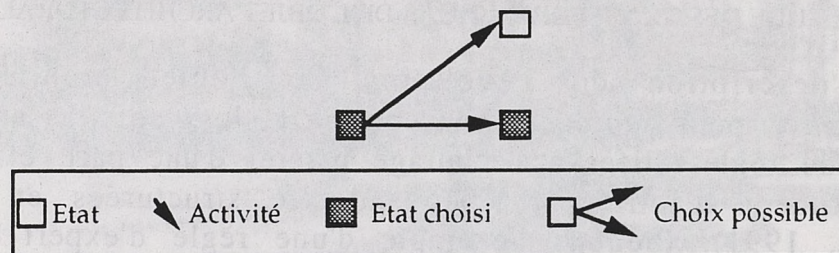


Fig. 3.1 : sur quoi travaille-t-on?

L'activité est le processus de la conception architecturale. Ce processus est de deux types (voir Lebahar, 1983), la planification (processus lié à la déduction logique) et la créativité (processus qui sert à "rendre le monde intelligible d'une manière que les impératifs de la logique seule ne sauraient permettre" (Holton 1981); la créativité se situe entre "les pôles suivants : archétype - doctrine - paradigme - idéologie" (Farel 1991)

L'état est l'esquisse elle-même. Nous constatons que quel que soit le type "d'activité" dans la conception architecturale, le résultat de "l'activité" est, dans la grande majorité des cas, une esquisse (ou pré-esquisse, croquis, schéma, ...). Cette esquisse peut être vue comme une structure d'objets. La structure d'objets (appelée encore structure de langage du bâtiment ou structure des données du

bâtiment) représente en fait un modèle de bâtiment¹. Ce modèle consiste en une structure comprenant des catégories d'objets (par exemple, paroi et espace) liées par des relations multiples (hiérarchiques, sémantiques, etc... par exemple paroi définit espace) et affectées d'attributs (par exemple, transparent, opaque pour les parois). Cette structure logique doit permettre une communication à deux niveaux : une communication entre les éléments d'un système informatique (entre le modeleur graphique, la base de données, les bases de faits, les bases de connaissances, les interfaces, les fichiers externes, etc...) et une communication entre différents systèmes informatiques. Dans cette phase, nous nous intéressons à décrire l'évolution de cette structure d'objets.

3.4.2 Notre approche

Pour comprendre l'évolution de cette structure, nous avons choisi d'interviewer des architectes de différents environnements professionnels qui utilisent des logiciels de CAO et qui ont au moins un projet construit. Le questionnaire était semi-dirigé : une partie de la structure d'objets était présentée avec les relations et les attributs provenant du modèle de données intégré du projet COMBINE² que nous avons enrichi. La première question posée aux architectes était de nommer les phases et les sous-phases d'évolution du projet, du design préliminaire au chantier. Ces phases étaient écrites sur la première ligne du tableau dont la première colonne était la structure d'objets. Les architectes ont utilisé les signes +esp, +ti, +i, +p pour indiquer quand, dans le projet, un élément est connu seulement dans l'esprit de l'architecte (+esp) ou de manière très imprécise (+ti), imprécise (+i), ou précise (+p).

¹ Voir : Etude comparative de modèles conceptuels de données pour le bâtiment - Eléments en vue de la définition d'un modèle de référence, B. Ferries, A. Dubois, A. Cutting-Decelle, L. Mudri, Fascicule de documentation Z68-370, AFNOR, 1993.

² Computer Models for the building Industry in Europe, DGXIII - JOULE, partie concernée: le modèle de données intégré développé au CSTB (Sophia Antipolis).

Nous montrons ici une partie de la structure d'objets présentée aux architectes durant les interviews.

Entity: Enclosure Element - Paroi

name of the other object or attribute	description of the attribute	value of attribute
(has) Exposure to sun	Importance of the effects of external climate (building -local-site exposure)	North, South East, West or degree from northern axis
(has) Prospect	Importance of the effects of the site (building -local-site exposure)	open, rather open, rather closed, closed
(has) Element Geometry	Geometric description of the enclosure element	dimensions: x, y, z. area, volume
(has) Side	One of the side of the enclosure element (external, internal...)	linked to color, materials, reflectionfactor..
(includes) Technical component	the list of the embedded components	tubes ...

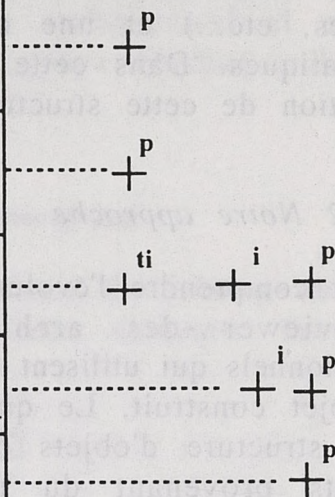
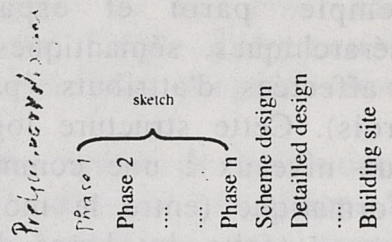


Fig. 3.2 Extrait du questionnaire avec réponses de l'architecte

3.4.3 Conclusion des interviews

- Niveaux conceptuels des objets architecturaux

Nous avons vu que les objets architecturaux ne sont pas tous au même niveau conceptuel dans la structure (Mitchell, 1991). Tout d'abord, nous avons identifié trois niveaux d'objets dans le modèle de bâtiment : les objets physiques du bâtiment (murs, espaces, etc...), les objets axiologiques (qualité de l'ambiance, etc...) et les objets intentionnels (intentions, émotions, niveaux d'aspiration de l'architecte). Ensuite, nous avons remarqué que, à différents niveaux, le nombre et la précision des objets n'évoluent pas de la même manière. Pour les objets du niveau 3, le niveau des intentions, le nombre et la précision des descriptions est constant. Si l'intention architecturale est de créer un bâtiment qui ne touche pas le sol, ça reste son aspiration durant toute la conception et même ensuite. Pour les objets du premier niveau, niveau des objets physiques, le nombre est croissant et la précision est croissante ou

constante. Nous allons nous concentrer sur les objets du premier niveau, les objets physiques du bâtiment.

A ce niveau, on peut distinguer trois groupes : le premier groupe d'objets est connu d'une manière précise ou imprécise dès les premières esquisses ou durant l'esquisse, le second est inconnu durant la phase d'esquisse et ne se définit qu'à la fin de la conception architecturale (APS), et le troisième est très imprécis ou inconnu durant la phase d'esquisse et ne devient précis que dans l'APD où les ingénieurs font les vérifications.

Le premier groupe inclut

a) les données du site¹ :

le type de zone (industrielle, urbaine, rurale),

la localité géographique en France (sud, central vers sud, central vers nord et nord variant de 42 à 51 degrés de latitude nord),

les facteurs des réflexions des surface du contexte autour du bâtiment futur, etc...

Nous nous attachons ensuite à définir pour certains objets du bâtiment la manière dont ils sont définis durant l'esquisse et comment évolue la précision² de leur définition (voir tableau page suivante).

¹Ce sont les données que nous souhaitons voir dans un programme. Les programmes actuels n'offre pas suffisamment d'informations concernant l'éclairage naturel.

²Les résultats dans cette table représentent une partie des réponses des architectes interviewés (la partie concernant les objets qui nous intéresse spécialement pour la question d'éclairage naturel). La colonne *précision en esquisse* montre que tous les architectes ont considéré ces objets comme détectable sur une esquisse indépendamment des types de projet

b) les objets du bâtiment :

précision en esquisse

exposition au soleil (nord, sud ...)	précis; très tôt dans l'esquisse
exposition au vent (si vent dominant)	précis; très tôt dans l'esquisse
exposition au prospect	d'imprécis à assez précis; dans les différentes phases d'esquisse (suivant les architectes)
ombres lointaines (les ombres venant des obstacles éloignés)	d'imprécis à assez précis; dans les différentes phases d'esquisse
ombres proches (les ombres venant des masque proches - en principe du bâtiment lui-même)	d'imprécis à assez précis; plutôt dans la deuxième phase de l'esquisse
rapport de vitrage (surface de la vitre sur la surface totale de la façade)	d'imprécis à assez précis; dans les différentes phases d'esquisse
rapport intérieur de vitrage (surface de la vitre sur la surface habitable du plancher de la pièce)	d'imprécis à assez précis; dans les différentes phases d'esquisse
inclinaison des parois extérieures (par rapport au sol de l'intérieur)	précis; très tôt dans l'esquisse
dimension des parois ¹	d'imprécis à assez précis durant l'esquisse

Dans le second groupe, on trouvera en général l'utilisation de certains matériaux, la couleur, les finitions, etc... et dans le troisième groupe certains objets-attributs comme l'épaisseur de l'isolant, les coefficients d'infiltration, etc...

¹Nous parlons ici des projets qui répondent au concours ou des projets des étudiants à l'école et non pas des projets pour lesquels l'architecte est en relation avec une entreprise de réalisation, cas dans lequel les dimensions des parois et les trames sont déjà prédéfinis

- Le choix des critères introduits une priorité temporelle dans la conception des objets.

L'évolution des objets architecturaux n'est pas progressive en largeur et en profondeur simultanément. Les architectes font d'abord certains choix des critères primordiaux. On peut considérer cette étape comme un processus en largeur. Ensuite ils approfondissent, en premier lieu, les critères primordiaux - approche en profondeur -. (Il ne nous semble donc pas, comme on le lit parfois que l'architecte dans sa recherche d'une synthèse conserve à l'esprit en permanence l'ensemble des besoins à satisfaire, des critères à prendre en compte). Cette remarque nous semble également cohérente avec les travaux des psychologues cognitivistes sur notre capacité à manipuler simultanément un nombre limité de concepts. Les choix des critères primordiaux faits par l'architecte déterminent en fait les objets sur lesquels il va d'abord travailler en estimant que les autres objets s'intégreront dans la structure imaginée dans les phases ultérieures de sa conception. Cela influe bien entendu sur la structure et les objets qui appartiennent au deuxième et troisième groupe. En effet, si un objet (qu'on pourrait dans de nombreux cas placer dans le deuxième ou troisième groupe) est lié à l'un des critères primordiaux, il appartiendra alors au premier groupe que nous avons défini et apparaîtra sur l'esquisse.

- Une alternance création - validation

On peut également retirer des interviews des architectes qu'il y a deux grands types de phases au sein du processus de conception : des phases de création et des phases de validation. Les phases de validation permettent de comparer l'objet conçu avec ses propres intentions (ses choix primordiaux). Cela permet une "auto-validation" de l'objet créé mais également de la solidité et de la faisabilité du concept élaboré. Ces phases ne sont naturellement pas aussi tranchées dans la pratique de la conception mais il nous semble que dans notre objectif de didacticiel, l'utilisation d'un outil d'aide à la conception permette, d'une part à l'étudiant de bien prendre conscience de cette idée de validation et, d'autre part que celui-ci peut s'intégrer naturellement dans les phases de conception existantes.

- Comment structurer les méthodes ?

La conclusion importante de cette section est la suivante: il est d'abord nécessaire d'organiser les méthodes autour des objets qui appartiennent au même groupe, cela concerne essentiellement le premier groupe. Ensuite les connaissances doivent être organisées autour d'un nombre minimum d'objets de façon à ce qu'elles puissent être agrégées de différentes manières. La conclusion de cette partie de travail a influencé la modélisation d'une structure de critères en état de base et les structures de critères spécifiques (voir section 4.2)

Afin de faciliter et de promouvoir l'évolution du concept d'éclairage dans toute sa complexité durant l'évolution du concept de bâtiment, nous souhaitons montrer comment la qualité de l'ambiance lumineuse peut être appréciée durant la conception architecturale et dès les premières esquisses.

4 Maîtriser l'ambiance lumineuse en éclairage naturel

La question des espaces éclairés et de l'ombre se pose très tôt dans la conception. La première approche de l'architecte est qualitative (informelle et implicite); seulement dans un second temps, les méthodes quantitatives évaluent les choix de l'architecte. Nous avons pour objectif de faciliter la relation entre l'activité créative et l'activité de planification afin d'aider la conception. En d'autres termes, notre objectif est de renforcer les liens entre l'approche qualitative de l'architecte et l'approche quantitative de l'ingénieur.

Trois acteurs sont engagés dans le processus d'éclairage : l'observateur, la source lumineuse et l'objet. La qualité de l'éclairage dans un espace intérieur est fonction de paramètres extérieurs : position géographique du site, position du bâtiment dans le site... Elle est également fonction de paramètres qui font varier la quantité et la qualité de la lumière. Les données de l'éclairage naturel ne sont donc jamais fixes. L'éclairement comme la luminance ou la composition spectrale varient en fonction du temps, des saisons, des conditions météorologiques... (La luminance d'un ciel bleu ou couvert peut varier de 2000 à 8000 cd/m²). En outre, la qualité de la lumière dépend des caractéristiques des façades : obstructions, vitrages, etc... de la géométrie et de la morphologie des espaces intérieurs, des caractéristiques de l'espace intérieur ou de l'utilisation de l'espace. Enfin, la façon d'évaluer la qualité de l'éclairage naturel dans un espace intérieur dépend des

préférences de l'utilisateur, qui dépendent de son mode de vie qui est lui-même déterminé par des paramètres variables. Ces préférences varient avec les données socioculturelles (temps et climat) et les facteurs psychologiques.

4.1 EVALUATION CLASSIQUE DE LA QUALITÉ DE L'ÉCLAIRAGE

Les méthodes classiques pour vérifier la qualité d'une ambiance lumineuse nécessitent des informations que l'architecte ne connaît, en général, pas durant la phase d'esquisse. Ces techniques sont donc plutôt adaptées à la phase de fin de la conception architecturale. La plupart des données nécessaires sont, soit inconnues, soit imprécises durant la phase d'esquisse.

Par exemple, une technique bien connue est celle qui utilise la notion de facteur de jour F_j (rapport de l'éclairement au point intérieur considéré à l'éclairement extérieur sur un plan horizontal en site dégagé). Ce facteur F_j , exprimé en %, est la somme de trois composantes : une composante directe correspondant à ce qui est directement reçu du ciel, une composante extérieure réfléchie correspondant à ce qui est reçu de l'environnement (sol, prospect, façade), et une composante intérieure réfléchie qui est la conséquence des inter-réflexions dans l'espace intérieur. La connaissance de F_j en un grand nombre de points donne la photométrie de l'espace.

Il convient de remarquer que pour exprimer la composante directe F_{jD} de même que la composante extérieure réfléchie F_{jRE} , il est nécessaire de connaître les surfaces exactes et les types de vitrages pour chaque ouverture. Ces données sont déterminées à la fin du projet, ainsi le facteur de jour peut seulement être utilisé à la fin de la conception de l'architecte. De plus, les données qui sont connues dans la phase d'esquisse (site, orientation) ne peuvent être utilisées parce qu'elles sont combinées avec des données inconnues.

4.2. NOTRE APPROCHE

Notre objectif est de construire une agrégation de critères qui suivent de plus près l'évolution du concept de bâtiment. Pour cela, nous avons créé une structure arborescente de critères, présentée aussi comme structure d'indices (chacun des indices est lui-même une agrégation d'indices de niveau inférieur ou de données). Il existe un état de base et des états spécifiques de cette structure.

4.2.1 Structure d'indices en état de base (regroupement conceptuel)

Ce regroupement est fait par rapport à l'origine des données et prend en compte les résultats sur la dynamique de la conception : l'environnement, la façade et l'espace intérieur (voir Fig. 4.1 et Fig. 4.2).

Parmi les données liées à l'environnement (localité géographique, type de zone...), il se trouve aussi des données concernant la relation entre l'enveloppe du bâtiment et l'environnement (orientation des fenêtres, prospect... données connues très tôt dans la conception).

L'indice de la façade intègre d'abord les données liées aux ouvertures et à leurs occultations mais aussi la notion de morphologie de l'espace intérieur (parler de la surface d'une fenêtre n'a pas de sens si nous n'avons pas idée du volume de l'espace intérieur derrière la fenêtre).

Les données qui influencent l'indice de l'intérieur sont relatives à l'inconfort de l'ambiance lumineuse (provenant surtout de l'éblouissement) d'une part, et à la qualité d'ambiance en fonction des luminances, des saturations et teintes des matériaux et de la morphologie de l'espace d'autre part.

Ces trois indices peuvent être regroupés dans un indice d'ambiance lumineuse de la pièce (ou d'une partie de la pièce) qui par agrégation donne l'indice pour une zone.

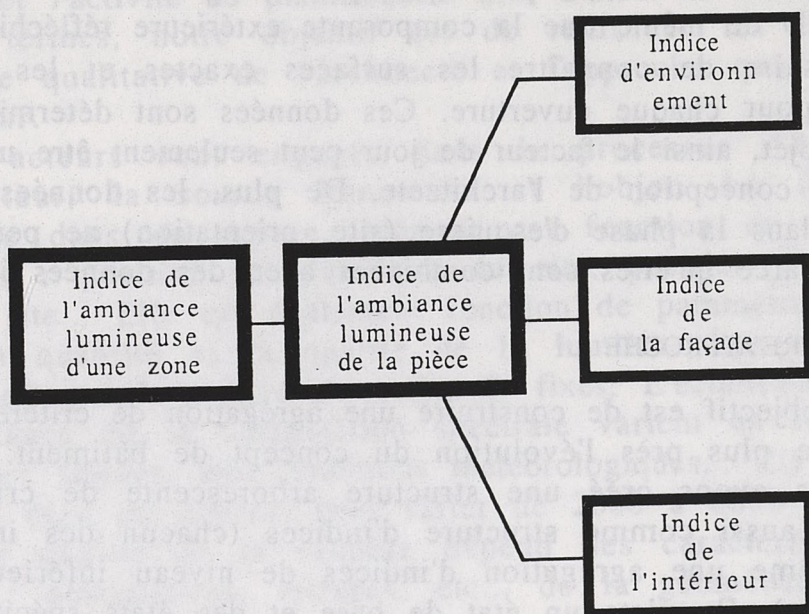


Fig. 4.1 La structure d'indices en état de base - partie 1

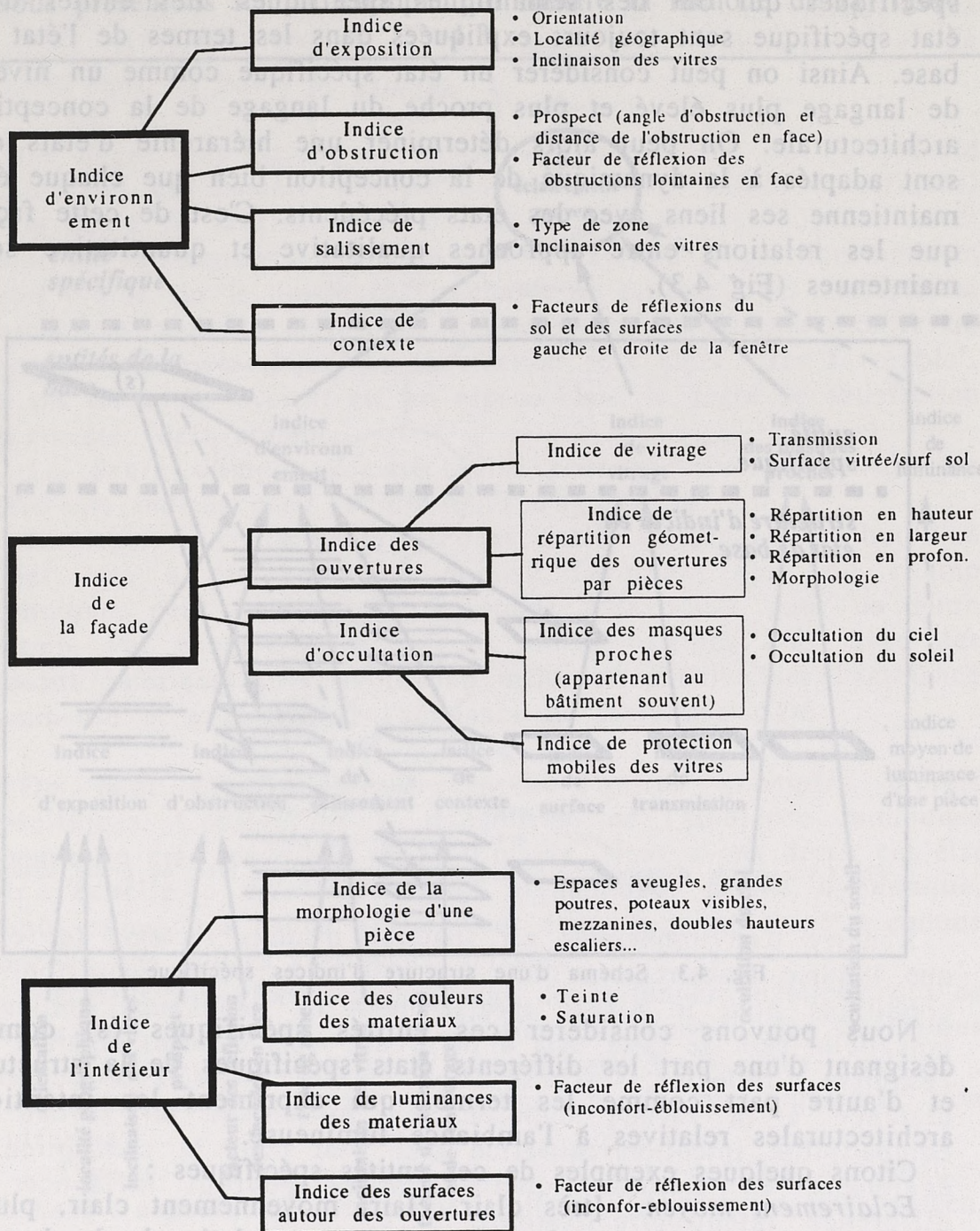


Fig 4.2 : La structure d'indices en état de base - partie 2

4.2.2 Structures d'indices spécifiques (regroupement opérationnel)

Nous pouvons ensuite dériver (de l'état de base) des états spécifiques qui ont des sémantiques spécifiques. Les entités d'un état spécifique sont toujours expliquées dans les termes de l'état de base. Ainsi on peut considérer un état spécifique comme un niveau de langage plus élevé et plus proche du langage de la conception architecturale. On peut alors déterminer une hiérarchie d'états qui sont adaptés à la dynamique de la conception bien que chaque état maintienne ses liens avec les états précédents. C'est de cette façon que les relations entre approches qualitative et quantitative sont maintenues (Fig 4.3).

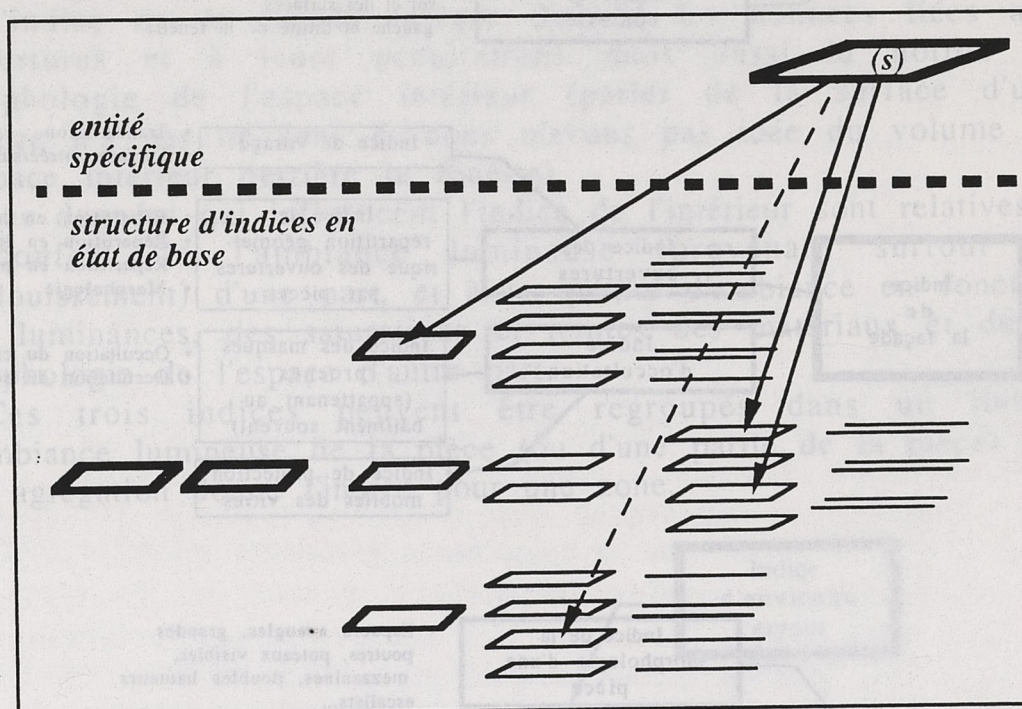


Fig. 4.3 Schéma d'une structure d'indices spécifique

Nous pouvons considérer ces entités spécifiques (s) comme désignant d'une part les différents états spécifiques de la structure, et d'autre part comme les termes qui expriment les intentions architecturales relatives à l'ambiance lumineuse.

Citons quelques exemples de ces entités spécifiques :

Eclairage moyen [très clair, clair, moyennement clair, plutôt sombre, sombre, très sombre]; *Répartition globale de la lumière* [uniforme, plutôt uniforme, non-uniforme, non-uniforme]; *Ambiance lumineuse dynamique* [dramatique, très dynamique, plutôt dynamique, plutôt calme, très calme, triste] sans parler de la couleur etc...

L'arbre de l'entité spécifique : éclairement moyen
 (d'une pièce de morphologie simple ou d'une zone d'un espace de morphologie complexe)

Nous présentons ici un exemple qui illustre la méthode de la figure 4.3.

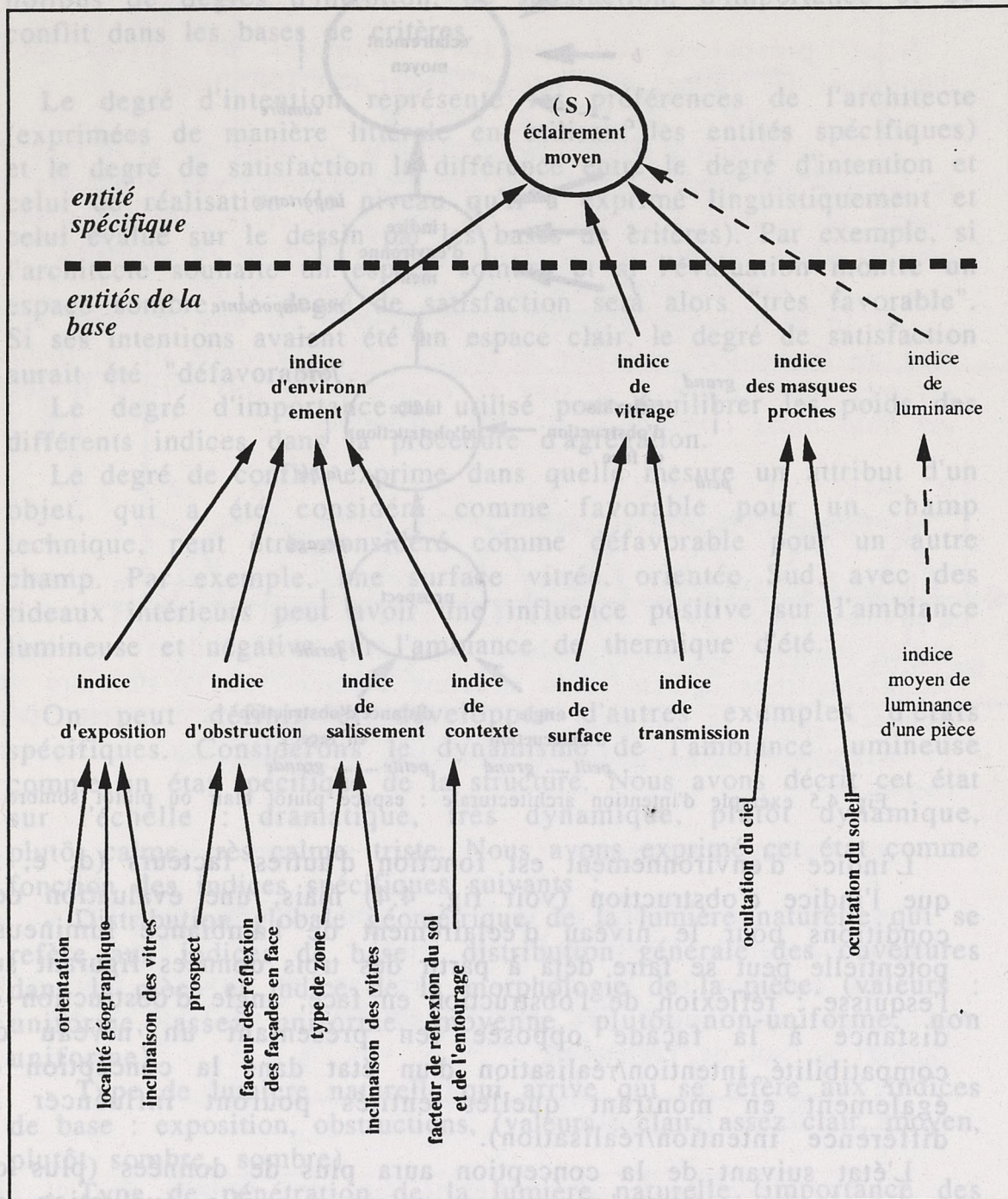


Fig. 4.4 structure d'indices spécifiques pour l'éclairement moyen

Cette structure permet donc une évaluation progressive de l'ambiance lumineuse. Nous allons expliquer ce caractère progressif de l'évaluation sur l'exemple du même sous-arbre (éclairage moyen).

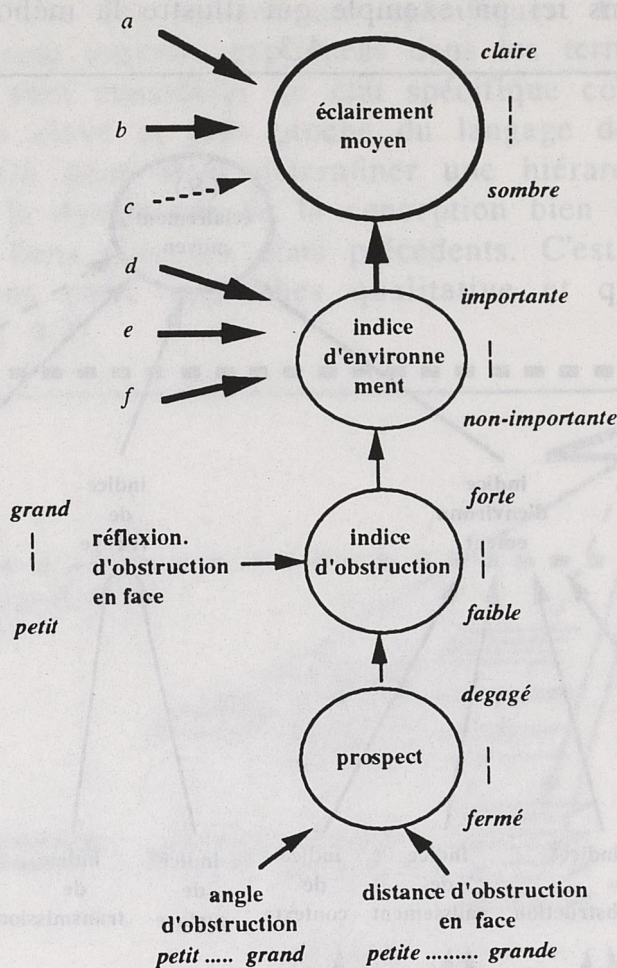


Fig 4.5 exemple d'intention architecturale : espace plutôt clair ou plutôt sombre

L'indice d'environnement est fonction d'autres facteurs (d, e, f) que l'indice d'obstruction (voir fig. 4.4) mais, une évaluation des conditions pour le niveau d'éclairage de l'ambiance lumineuse potentielle peut se faire déjà à partir des trois données figurant sur l'esquisse : réflexion de l'obstruction en face, angle d'obstruction et distance à la façade opposée (en présentant un niveau de compatibilité intention/réalisation d'un état dans la conception et également en montrant quelles entités pourront influencer la différence intention/réalisation).

L'état suivant de la conception aura plus de données (plus ou moins imprécises) qui permettront une nouvelle évaluation de l'arbre avec plus de critères (a,b ...f). L'architecte pourra donc, maîtriser la variation de l'écart intention/réalisation progressivement en suivant naturellement l'avancement de l'esquisse.

Ces évaluations ne sont donc a priori pas absolues mais relatives aux intentions exprimées. Pour permettre à l'architecte d'introduire ses préférences en termes d'ambiance, nous avons introduit les notions de degrés d'intention, de satisfaction, d'importance et de conflit dans les bases de critères.

Le degré d'intention représente les préférences de l'architecte (exprimées de manière littérale en utilisant les entités spécifiques) et le degré de satisfaction la différence entre le degré d'intention et celui de réalisation (le niveau qu'il a exprimé linguistiquement et celui évalué sur le dessin par les bases de critères). Par exemple, si l'architecte souhaite un espace sombre et si l'évaluation montre un espace sombre, le degré de satisfaction sera alors "très favorable". Si ses intentions avaient été un espace clair, le degré de satisfaction aurait été "défavorable".

Le degré d'importance est utilisé pour équilibrer les poids des différents indices dans la procédure d'agrégation.

Le degré de conflit exprime dans quelle mesure un attribut d'un objet, qui a été considéré comme favorable pour un champ technique, peut être considéré comme défavorable pour un autre champ. Par exemple, une surface vitrée, orientée Sud, avec des rideaux intérieurs peut avoir une influence positive sur l'ambiance lumineuse et négative sur l'ambiance de thermique d'été.

On peut définir et développer d'autres exemples d'états spécifiques. Considérons le dynamisme de l'ambiance lumineuse comme un état spécifique de la structure. Nous avons décrit cet état sur l'échelle : dramatique, très dynamique, plutôt dynamique, plutôt calme, très calme, triste. Nous avons exprimé cet état comme fonction des indices spécifiques suivants :

- Distribution globale géométrique de la lumière naturelle qui se réfère aux indices de base : distribution générale des ouvertures dans la pièce et indice de la morphologie de la pièce. (valeurs : uniforme, assez uniforme, moyenne, plutôt non-uniforme, non uniforme).

- Type de lumière naturelle qui arrive qui se réfère aux indices de base : exposition, obstructions, (valeurs : clair, assez clair, moyen, plutôt sombre, sombre).

- Type de pénétration de la lumière naturelle (importance des ombres) qui se réfère aux indices de base : masques proches du bâtiment lui-même et indice de protection mobile des vitres (valeurs : simple, sophistiquée très sophistiquée),

- Type de contraste : indice pour les contrastes de luminance et indice des surfaces autour des ouvertures (valeurs possibles : très doux, doux, moyen, fort, très fort).

Cet état peut être évalué par rapport à l'état du ciel: sombre couvert (en hiver), clair couvert (en été), soleil haut, soleil bas.

Nous présentons ici quelques exemples de règles pour déterminer les valeurs des indices de cet état spécifique :

Si la distribution globale de la lumière est uniforme et le type de la lumière est sombre et le type de la pénétration de la lumière est simple et le type de contraste est très doux et le ciel est sombre couvert alors l'ambiance est triste; (sans parler de la couleur).

Si la distribution globale de la lumière est non-uniforme et le type de la lumière est clair et le type de pénétration de la lumière est très sophistiquée et le type de contraste est très fort et le soleil est haut alors l'ambiance est très dynamique.

4.3 PRÉSENTATION DES INDICES

Nous présentons ensuite les critères relatifs à l'indice d'environnement (voir fig. 2). Les critères sont explicités par des règles d'expert et les ensembles flous des données dans les règles. Nous montrons également la structure d'objets (ou la structure des données) pour le bâtiment relative à l'indice d'environnement pour l'évaluation de l'ambiance lumineuse en éclairage naturel en esquisse.

4.3.1 Indice d'exposition

Cet indice est fonction de la localité géographique du bâtiment, de l'orientation et de l'inclinaison des vitres.

Nous étudions ici les zones se trouvant en France; nous nous orientons par rapport au nord; l'inclinaison des vitres est par rapport au sol de l'intérieur.

4.3.1.1 Règle d'exposition

Plus la localisation du bâtiment est vers France sud et plus l'orientation des vitres est vers sud et plus l'inclinaison des vitres est petite, alors plus l'exposition à l'éclairage naturel de l'espace intérieur est forte.

4.3.1.2 Représentation des ensembles flous dans la règle d'exposition

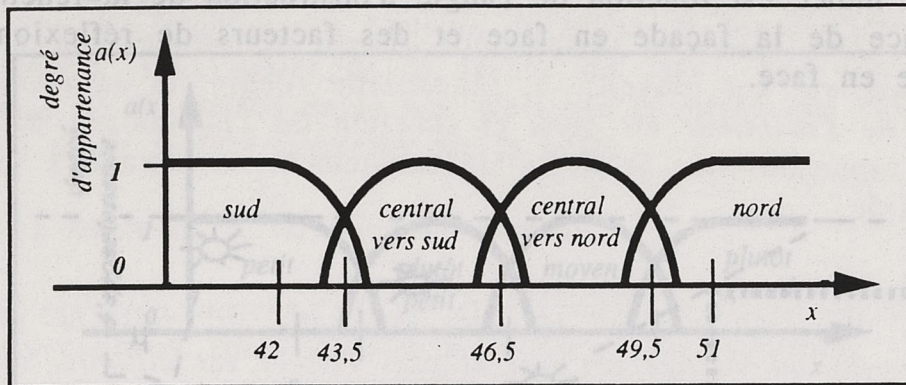


Fig.4.6 L'ensemble flou de la localisation géographique en France
 x représente le degré de latitude nord

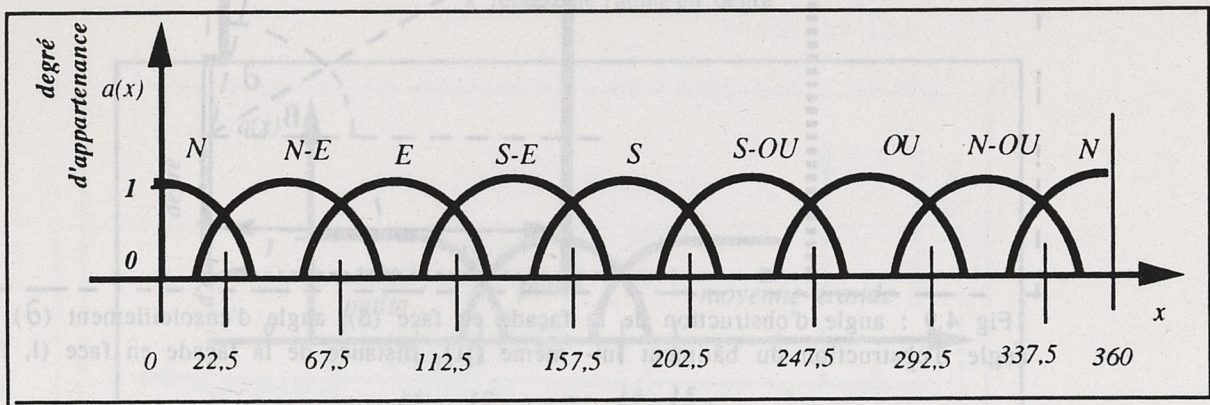


Fig.4.7 L'ensemble flou de l'orientation des vitres par rapport au-nord
 x représente le degré d'orientation (par rapport au nord qui correspond au 0)

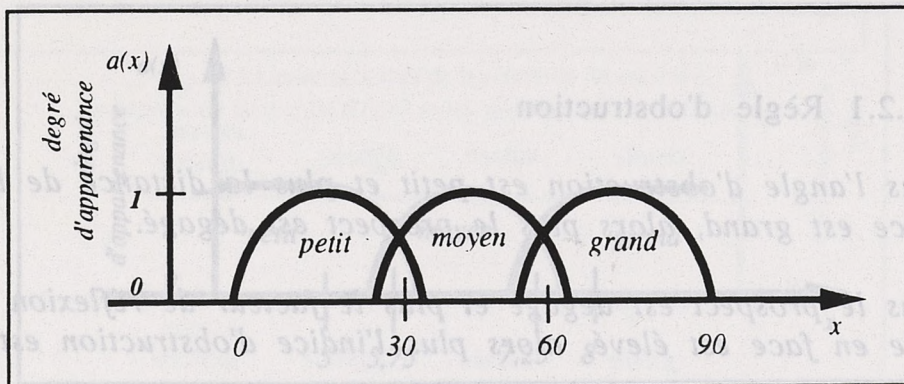


Fig.4.8 L'ensemble flou de l'inclinaison des vitres
 x représente le degré de l'inclinaison (par rapport au sol de l'intérieur)

4.3.2 Indice d'obstruction

Cet indice est fonction de l'angle d'obstruction de la fenêtre, de la distance de la façade en face et des facteurs de réflexions de la façade en face.

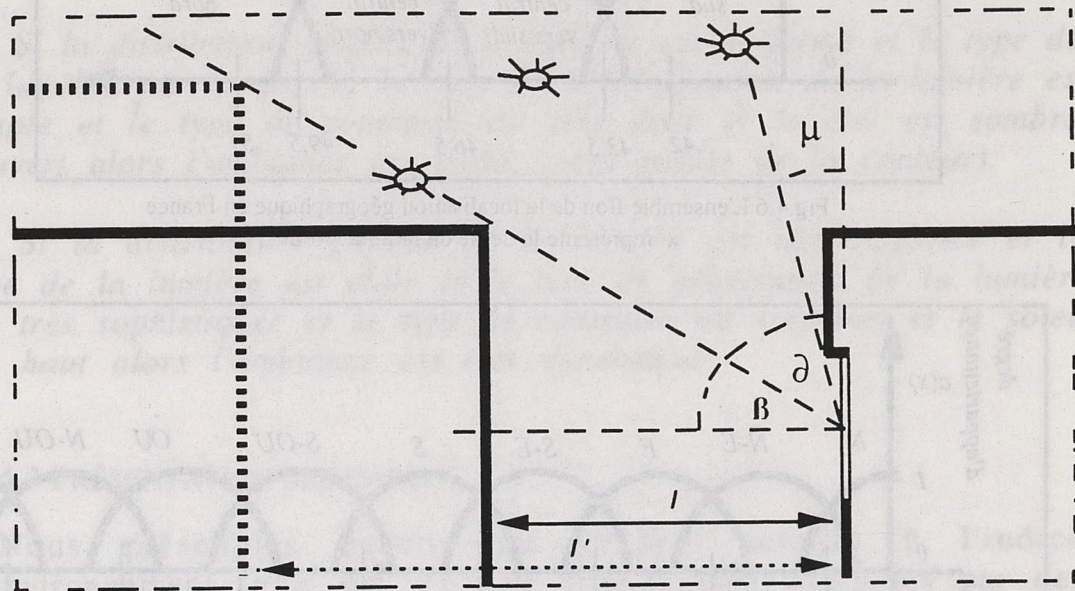


Fig 4.9 : angle d'obstruction de la façade en face (β), angle d'enseillement (θ), angle d'obstruction du bâtiment lui-même (μ), distance de la façade en face (l, l')

Définition : Le facteur de réflexion est le rapport du flux réfléchi au flux incident dans des conditions données.

4.3.2.1 Règle d'obstruction

Plus l'angle d'obstruction est petit et plus la distance de la façade en face est grand, alors plus le prospect est dégagé.

Plus le prospect est dégagé et plus le facteur de réflexion de la façade en face est élevé, alors plus l'indice d'obstruction est faible.

4.3.2.2. Représentation des ensembles flous dans la règle d'obstruction

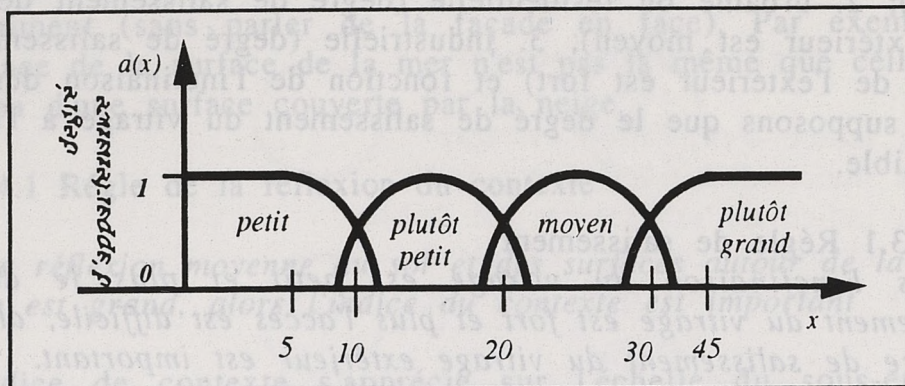


Fig.4.10 L'ensemble flou de l'angle d'obstruction
 x représente l'angle en degré

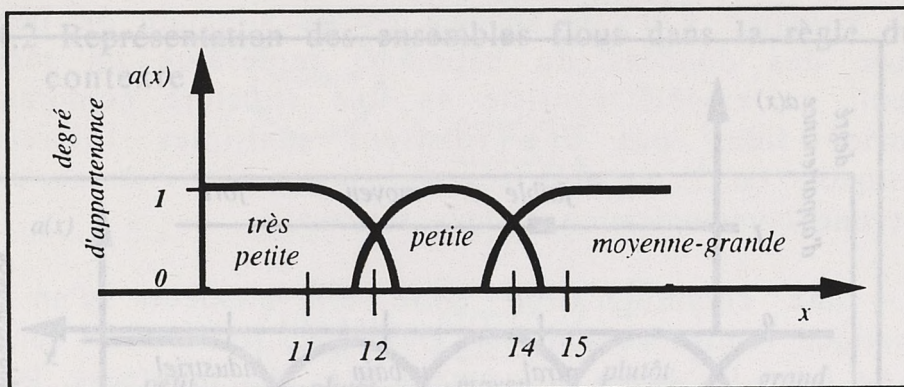


Fig.4.11 L'ensemble flou de la distance de la façade en face
 x représente la distance en mètres

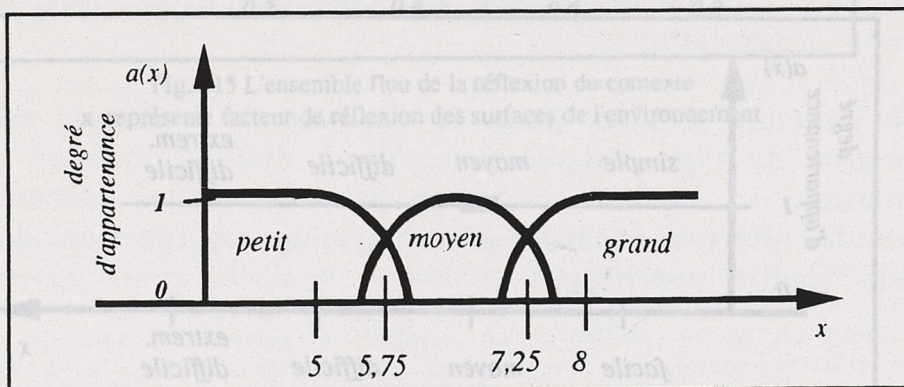


Fig. 4.12 L'ensemble flou de facteurs de réflexions de la façade en face
 x représente le facteur de réflexion

4.3.3. Indice de salissement

Cet indice est fonction de la localisation dans une région : 1. rurale ou suburbaine (degré de salissement des vitres de l'extérieur est faible); 2. urbaine ou résidentielle (degré de salissement des vitres de l'extérieur est moyen); 3. industrielle (degré de salissement des vitres de l'extérieur est fort) et fonction de l'inclinaison des vitres. Nous supposons que le degré de salissement du vitrage à l'intérieur est faible.

4.3.3.1 Règle de salissement

Plus l'inclinaison du vitrage est petit et plus le degré de salissement du vitrage est fort et plus l'accès est difficile, alors plus l'indice de salissement du vitrage extérieur est important.

4.3.3.2. Représentation de l'appartenance dans la règle de salissement

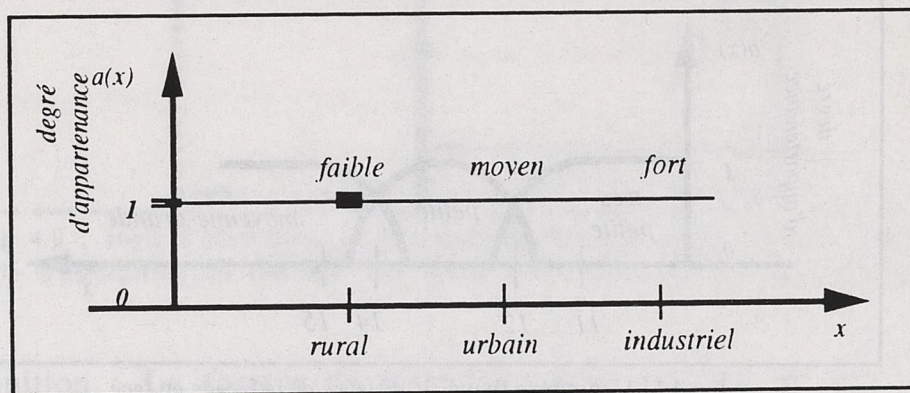


Fig.4.13 Degré de salissement de la surface extérieure de vitrage
x représente la zone urbaine

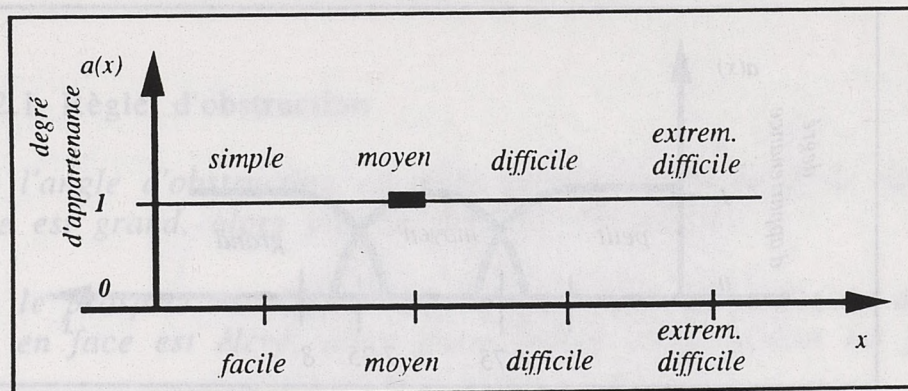


Fig.4.14 Degré de facilité du nettoyage du vitrage
x représente facilité d'accès aux vitres

4.3.4 Indice de réflexion du contexte

Cet indice est fonction des facteurs de réflexion des surfaces autour du bâtiment (sans parler de la façade en face). Par exemple, la luminance de la surface de la mer n'est pas la même que celle d'une forêt ou d'une surface couverte par la neige.

4.3.4.1 Règle de la réflexion du contexte

Si la réflexion moyenne du sol et des surfaces autour de la fenêtre est grand, alors l'indice du contexte est important

L'indice de contexte s'apprécie sur l'échelle du sous-ensemble flou : important, plutôt important, moyen, plutôt faible, faible

4.3.4.2 Représentation des ensembles flous dans la règle du contexte

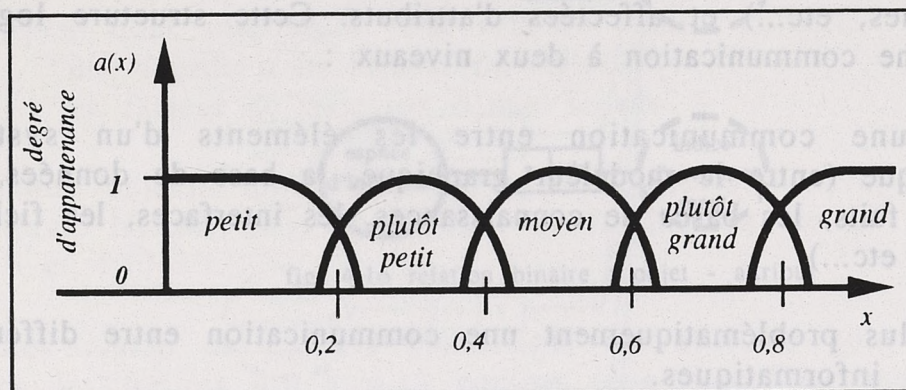


Fig.4.15 L'ensemble flou de la réflexion du contexte
x représente facteur de réflexion des surfaces de l'environnement

4.3.5 *Indice d'environnement*

Cet indice exprime l'incidence de l'environnement sur la quantité de lumière naturelle susceptible d'entrer dans la pièce.

4.3.5.1 Règle d'environnement

plus indice d'exposition est fort
plus indice d'obstruction est faible
plus indice de salissement est faible
plus indice de contexte est élevé
alors plus indice d'environnement est grand

4.3.6 *Structure d'objets relative à l'indice d'environnement*

La structure d'objets (appelée encore structure de langage ou structure des données du bâtiment) représente un modèle de bâtiment; ce modèle consiste en une structure comprenant des catégories liées par des relations multiples (hiérarchiques, sémantiques, etc...) et affectées d'attributs. Cette structure logique permet une communication à deux niveaux :

1 - une communication entre les éléments d'un système informatique (entre le modèleur graphique, la base de données, les bases de faits, les bases de connaissances, les interfaces, les fichiers externes, etc...)

2 - plus problématiquement une communication entre différents systèmes informatiques.

Une structure d'objets (dans le domaine du bâtiment) est établie en fonction du type d'application c'est à dire en fonction des axes d'orientation du logiciel qui s'appuyera sur cette structure et du modèle de référence (partie générique), et en fonction de chaque méthode (partie spécifique).

4.3.6.1 Partie spécifique des données relatives à l'indice de l'environnement

Nous ne présentons pas ici la partie générique des données¹

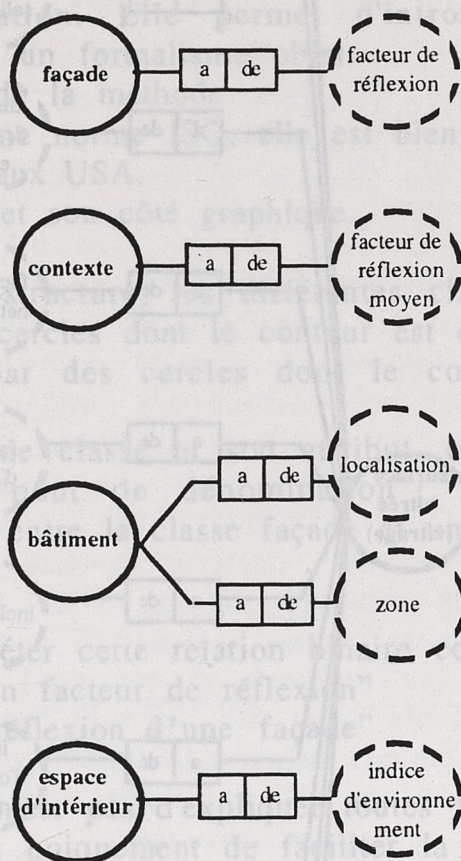


fig. 4.16 relation binaire : objet - attribut

¹A notre avis, les parties génériques des modèles de bâtiment qui sont, en ce moment, en conception doivent prendre en considération des structures de référence (le rapport GSD2, les résultats du groupe productique-au sein de l'Afnor et peut être d'autres). Ces travaux ne sont pas encore accessibles. Le problème de la compatibilité de la nomenclature et de la structuration des données (avec des travaux de références) devrait être traité dans la phase de la conception des nouveaux modèles et non pas une fois que le concept est terminé.

Pour ces raisons, nous présentons ici seulement les spécificités de notre structure mais il serait souhaitable que la partie générique soit compatible au niveau de la nomenclature et de la structure avec des travaux qui étudient la synthèse des modèles pour le bâtiment et nous envisageons la suite de notre structuration dans ce sens.

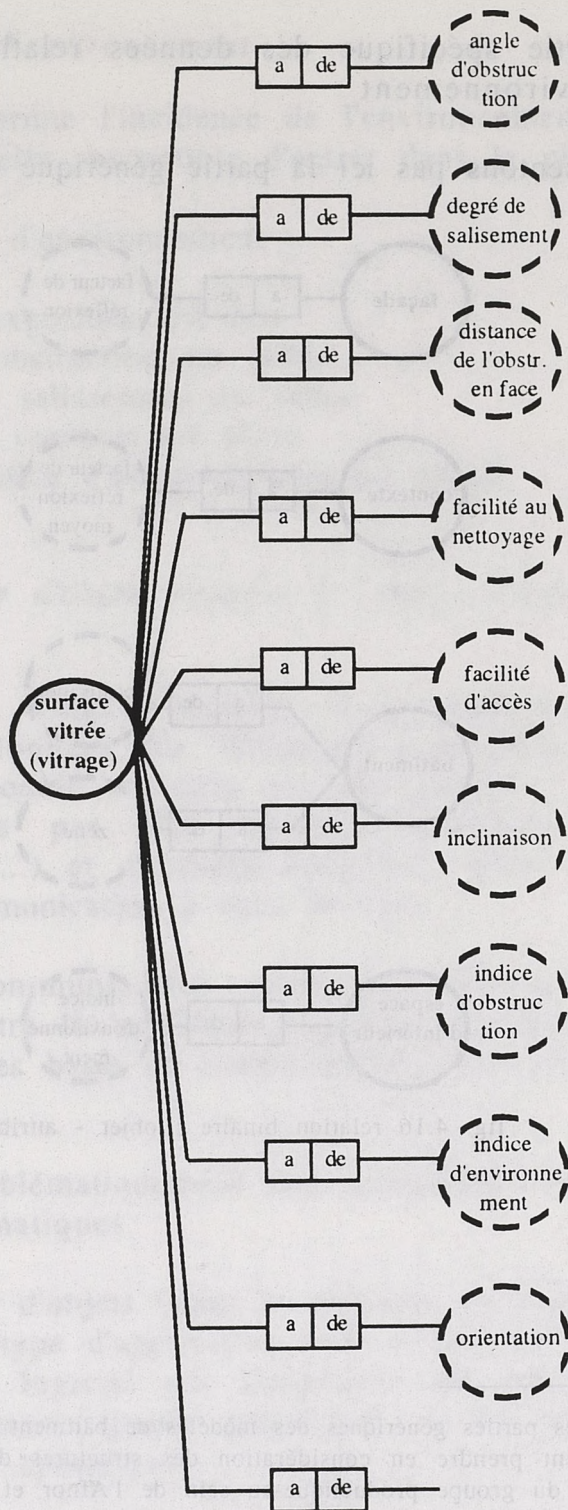


fig. 4.17 relation binaire : objet - attribut

Cette structure d'objets est exprimée en formalisme NIAM (Nijssen Information analysis Method). Nous l'avons choisie :

- pour une raison technique
NIAM est une méthode de type entité-association qui intègre la notion de spécialisation. Elle permet d'introduire les notions d'héritage, basées sur un formalisme objet.
- pour la popularité de la méthode
NIAM fait l'objet d'une norme ISO, elle est bien connue et souvent utilisée en Europe et aux USA.
- pour son efficacité et son côté graphique.

Dans le schéma de structure, les différentes classes d'objets sont représentées par des cercles dont le contour est en trait gras et les différents attributs par des cercles dont le contour est en trait pointillé

Cette liaison entre une classe et son attribut, est appelée dans le formalisme NIAM "pont de dénomination"¹, qui est une liaison binaire, par exemple, entre la classe façade et un attribut tel que le facteur de réflexion.

On peut donc interpréter cette relation binaire comme:

"une façade a un facteur de réflexion"

"un facteur de réflexion d'une façade"

Notre objectif ici n'est pas d'expliquer toutes les propriétés de la méthode NIAM, mais uniquement de faciliter la lecture des figures 4.16 et 4.17

Les classe de valeurs concernant les attributs sont présentées dans les figures 4.6 à 4.15 comme sous-ensembles flous; ce sont donc les ensembles qui contiennent une partie des informations permettant de donner un contenu aux règles d'expert.

¹ J. PIAGET, "Psychologie et épistémologie", Editions Denoel, 1971.

² A.F.E., "La lumière blanche", guide pour le projet de construction, Edition L'Architecte, Novembre 1983, p. 25.

¹ Voir Henry Habrias "Le modèle relationnel binaire" Méthode I.A. (NIAM), Ed Eyrolles 1988

4.4 D'OU VIENNENT LES DONNÉES ?

Les connaissances d'expert en question, modélisées et implémentées dans un environnement informatique représentent d'abord un outil d'évaluation. L'évaluation s'effectue sur les données situées dans la Base de Données. D'ou viennent ces données ?

Elles viennent soit de l'esquisse (orientation), soit de la saisie directe de l'architecte (intentions), soit du programme architectural (localité géographique) ou encore de la BD déjà existante (données météorologiques d'une localité géographique).

Nous montrons ici l'origine des données pour l'entité spécifique éclairément moyen.

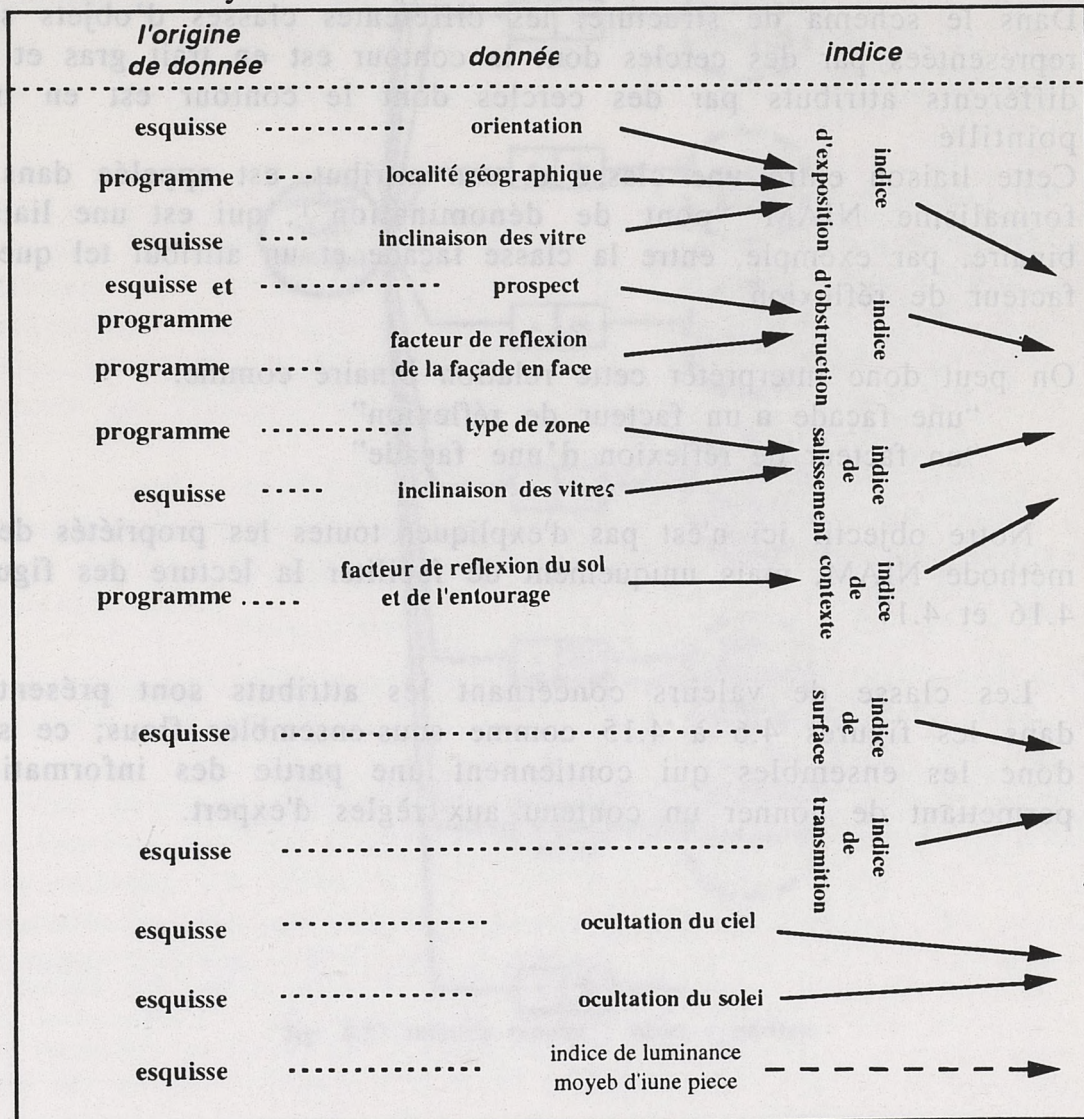


Fig 4.18 : l'origine des données

4.3.8 D'OU VIENNENT LES CONNAISSANCES ?

Il convient de bien faire la distinction entre les données et les connaissances dans ces types de système de raisonnement. Par exemple, "La paroi de l'église est loin" peut être considérée comme une connaissance concernant la paroi de l'église. Cependant, tel qu'elle est présentée ici, elle n'est pas une connaissance (au sens utilisé dans la logique de raisonnement classique et non-classique), elle est considérée comme une donnée. Donc "la paroi de l'église est loin", "l'angle est 30°", "x=a" sont des données. A l'opposé, une connaissance peut être vue comme une relation causale sur les données qui apporte de nouvelles informations. Une connaissance s'appuie sur des données, les manipule, les met en relation pour faire apparaître d'autres formes d'informations, de nouvelles données. "La connaissance est toujours en devenir et consiste à passer d'une moindre connaissance à un état plus complet et plus efficace"¹. La connaissance peut être vue comme un processus ordonné de manipulation des données. Nous ne visons pas, bien entendu, à donner une explication complète de ce qu'est la connaissance mais à faire comprendre une différence importante pour notre travail entre données et connaissances.

"Si la paroi en face (de la fenêtre) est loin et si l'angle d'obstruction (de cette fenêtre) est petit alors le prospect (pour cette fenêtre) est dégagé" est considérée comme une connaissance.

On peut distinguer quatre sources de connaissances à notre système :

- Les réglementations ou recommandations règlementaires. Par exemple, la règle de salissement (voir section 4.3.3.1) provient du guide pour le projet d'éclairage naturel².

- Les expérimentations et résultats de recherche. Certaines règles liées à l'indice de luminance concernant les relations entre les luminances plafond/sol/mur sont issues d'un article scientifique³.

- Les estimations des experts. On peut considérer deux valeurs extrêmes pour le prospect : le prospect ouvert, c'est-à-dire sans obstruction dans l'espace extérieur en face de la fenêtre (exprimé comme: angle d'obstruction $< 25^\circ$ et distance à la façade opposée > 14 mètres) et le prospect fermé, c'est-à-dire avec des obstructions

¹J. PIAGET, "Psychologie et épistémologie", Editions Denoël, 1971.

²A.F.E., "La lumière du jour dans les espaces intérieurs", guide pour le projet d'éclairage naturel, 1ère édition, Edition LUX, Novembre 1983, p. 25.

³K.F. ROLL, H.J. HENTSCHEL, "Luminance patterns in interior and balanced perception", proceedings of CIE VENEZIA, Venice, 1987.

importantes face à la fenêtre opposée à moins de 10 mètres faisant un angle d'obstruction de plus de 45°

- Les simulations permettent de déterminer précisément les influences et les importances respectives d'indices pour lesquelles les experts ne peuvent estimer de relations quantitatives.

5. Modéliser et évaluer les objets architecturaux au moyen des ensembles flous et de la logique multivaluée

Pour permettre une structuration des critères des experts et des architectes qui suivent l'évolution du concept architectural ainsi qu'une modélisation du bâtiment, nous avons étudié différentes méthodes mathématiques. La logique des ensembles flous et les logiques multivalentes nous ont paru les plus adaptées à cet objectif. Nous rappelons, tout d'abord, ici brièvement certaines notions et techniques en théorie des ensembles flous.

L'objectif de cette section est de montrer la capacité des ensembles flous à modéliser, d'une part, les objectifs explicites de l'architecte (intentions spécifiées au système) dans les phases amonts du processus de conception, et, la nature imprécise et incertaine des informations déduites d'une observation de l'esquisse (information graphique) et d'une spécification de l'environnement du projet d'autre part. Pour cela, nous proposons une procédure permettant d'évaluer et de moduler le degré de compatibilité entre l'esquisse et les objectifs explicites de l'architecte.

5.1 COMPARAISON DES ENSEMBLES CLASSIQUES ET FLOUS

Considérons la règle suivante utilisée par les experts dans le domaine de l'ambiance lumineuse :

Règle du prospect : Si l'angle d'obstruction est petit et la distance du bâtiment à la façade en face est importante alors le prospect est dégagé.

Cette règle peut être traduite en utilisant le langage de la logique du premier ordre par la formule suivante:

$$S(x) \wedge L(y) \Rightarrow O(z)$$

où, $S(x)$ peut être lu comme "L'angle x est petit", $L(y)$ peut être interprété comme "La distance est importante" et $O(z)$ comme "Le prospect est ouvert".

Toutefois, la présence de spécifications imprécises dans la description des objets architecturaux ne permet pas d'évaluer exactement les quantités x et y . De plus, même si x et y était connu précisément, il semble difficile de décider si x est *petit* ou *grand*, si y est *important* ou non. Naturellement, dans une telle situation, on peut être tenté de définir, à l'aide d'experts, des seuils permettant d'établir des séparations claires entre le *petit* et le *grand*, l'*important* et le *non-important*. Toutefois, à notre avis, la définition de seuils n'est pas appropriée. Par exemple, si nous supposons qu'un angle d'obstruction supérieur à 40,0 degrés est grand, que dire d'un angle de 39,9 degrés? En fait, le manque de continuité existant dans la modulation des valeurs de vérité des prédicats nous semblent un sérieux écueil. Nous allons montrer, sur l'exemple qui suit, comment on peut considérer les ensembles des angles d'obstruction en logique classique et en logique des ensembles flous.

Soit la règle suivante : un angle d'obstruction peut être qualifié de petit s'il est inférieur à 25°, de moyen s'il est autour de 35°, de grand s'il est supérieur à 45°.

En logique classique, l'ensemble des angles d'obstruction se modélise de la manière suivante: l'ensemble A représente les angles d'obstruction moyens et B l'ensemble des angles d'obstruction grands.

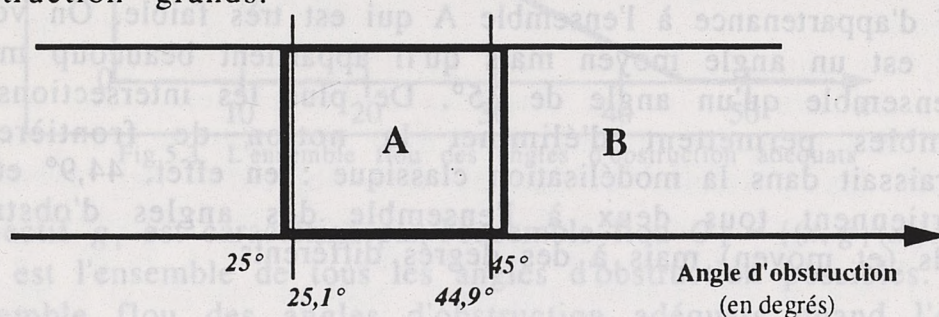


Fig.5.1: modélisation en logique classique

On remarque, d'une part, sur ce schéma que, un angle de 44,9° est moyen alors qu'un angle de 45,1° est grand bien que l'écart entre ces deux angles soit non significatif. D'autre part, les angles de 44,9° et de 25,1° sont tout deux qualifiés de moyen alors que l'écart entre ces deux angles est important et bien supérieur à l'écart entre 44,9° et 45,1°. Or, comme rien ne permet de justifier qu'il existe de telles frontières pour des valeurs particulières de l'angle d'obstruction (comme ici à 45°), cette modélisation ne paraît pas pertinente.

La logique des ensembles flous permet de dépasser cette difficulté en modulant le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble. Ainsi sur la figure qui suit, on voit que $25,1^\circ$ et $44,9^\circ$ font tous les deux partie de l'ensemble A des angles d'obstruction moyen comme dans la modélisation précédente mais on dispose d'une information supplémentaire qui est une quantification de "combien" ils appartiennent à l'ensemble.

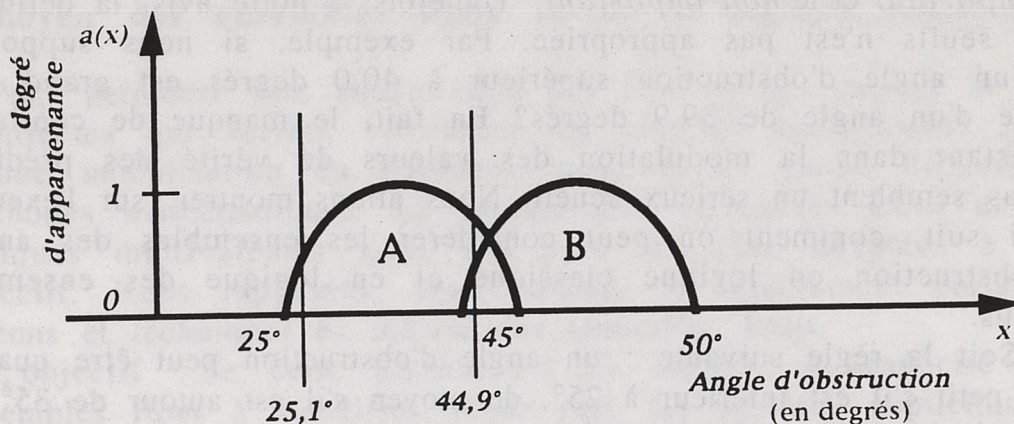


Fig.5.2: Modélisation en logique des ensembles flous

Dans cette modélisation, on remarque que $25,1^\circ$ et $44,9^\circ$ ont un degré d'appartenance à l'ensemble A qui est très faible. On voit que $45,1^\circ$ est un angle moyen mais qu'il appartient beaucoup moins à cet ensemble qu'un angle de 35° . De plus les intersections entre ensembles permettent d'éliminer la notion de frontières qui apparaissait dans la modélisation classique : en effet, $44,9^\circ$ et $45,1^\circ$ appartiennent tous deux à l'ensemble des angles d'obstruction grands (et moyen) mais à des degrés différents.

5.2 MODÉLISER LES OBJECTIFS DE L'ARCHITECTE AVEC DES ENSEMBLES FLOUS

Soit X un ensemble classique d'objets appelé *univers* dont les éléments génériques sont appelés x . Habituellement, un sous-ensemble classique A de X est caractérisé par sa fonction caractéristique f_A de X dans $\{0, 1\}$ tel que $f_A(x) = 1$ si x appartient à A et 0 sinon. Pour introduire une certaine gradualité dans l'appartenance de x à A , il est possible d'étendre l'ensemble des valeurs $\{0, 1\}$ à l'intervalle réel $[0, 1]$. Ainsi, plus la valeur de $f_A(x)$ est proche de 1, plus x appartient à A . Dans ce cas, le sous-ensemble A n'a pas de frontière nette.

On dit qu'il est un sous-ensemble flou de X (Zadeh, 1965) et il est complètement défini par l'ensemble :

$$A = \{(x, f_A(x)), x \in X\}$$

A notre avis, les ensembles flous sont bien adaptés à la définition des objectifs des architectes, et ce avec la granularité appropriée. Par exemple, supposons que l'objectif actuel de l'architecte soit d'obtenir un espace clair (par rapport à la lumière naturelle). Dans ce cas, il semble raisonnable de modéliser cet objectif g_1 de l'architecte sur la conséquence *angle d'obstruction* par un sous-ensemble flou G_1 sur l'échelle $X = [0, 90]$ degrés. G_1 est caractérisé par la fonction d'appartenance suivante :

$$f_{G_1}(x) = 1 \text{ if } x \leq 25$$

$$f_{G_1}(x) = (45 - x)/20 \text{ if } 25 \leq x \leq 45$$

$$f_{G_1}(x) = 0 \text{ if } x \geq 45$$

Ce qui donne la figure suivante :

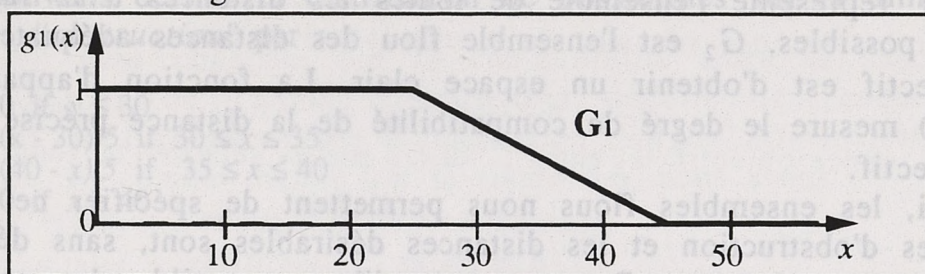


Fig.5.3. L'ensemble flou des angles d'obstruction adéquats

L'objectif g_1 est caractérisé par l'ensemble flou $G_1 = \{(x, g_1(x)), x \in X\}$ où X est l'ensemble de tous les angles d'obstruction possibles. G_1 est l'ensemble flou des angles d'obstruction adéquats quand l'objectif est d'obtenir un espace clair. La fonction d'appartenance $g_1(x)$ mesure le degré de compatibilité de l'angle d'obstruction précis x avec l'objectif : $g_1(x) = 1$ signifie que x est totalement adéquat, alors que $g_1(x) = 0$ signifie que x ne convient pas du tout (la valeur 0.5 peut être vue comme une compatibilité moyenne). Il est intéressant de noter que l'angle d'obstruction n'est pas une pure variable de décision. De fait, l'architecte n'a pas la possibilité de choisir la hauteur du bâtiment en face. Sa seule possibilité est de modifier l'élévation des fenêtres. Toutefois, il est important de mesurer combien l'angle d'obstruction est adapté à l'objectif.

De la même façon, l'objectif de l'architecte en termes de distance à la façade en face peut être défini par le sous-ensemble flou G_2 sur l'échelle $Y = [0, 20]$ mètres. G_2 est caractérisé par la fonction d'appartenance suivante :

$$\begin{aligned} f_{G_2}(y) &= 0 \text{ si } y \leq 10 \\ f_{G_2}(y) &= (y - 10)/4 \text{ si } 10 \leq y \leq 14 \\ f_{G_2}(y) &= 1 \text{ si } y \geq 14 \end{aligned}$$

Ce qui donne la figure suivante :

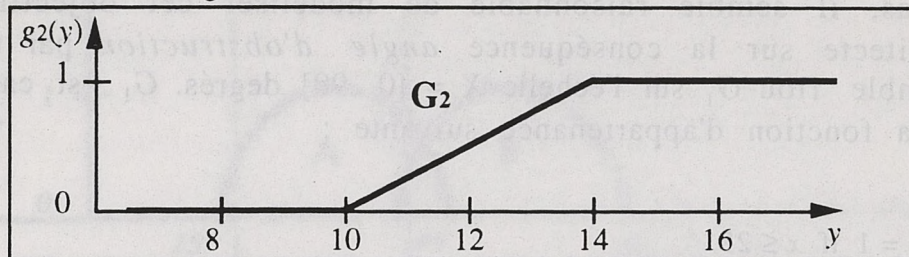


Figure 5.4 L'ensemble flou des distances à la façade opposée adéquates

L'objectif g_2 est caractérisé par l'ensemble flou $G_2 = \{(y, g_2(y)), y \in Y\}$ où Y représente l'ensemble de toutes les distances à la façade en face possibles. G_2 est l'ensemble flou des distances adéquates quand l'objectif est d'obtenir un espace clair. La fonction d'appartenance $g_2(y)$ mesure le degré de compatibilité de la distance précise y avec l'objectif.

Ainsi, les ensembles flous nous permettent de spécifier ce que les angles d'obstruction et les distances désirables sont, sans définir de délimitations claires. Remarquons qu'il est possible de prendre en compte les possibles évolutions des objectifs. Par exemple, si l'architecte désire un espace sombre, le nouvel objectif peut être défini par les deux sous ensembles flous :

$$G'_1 = \{(x, 1 - g_1(x)), x \in X\} \quad \text{et} \quad G'_2 = \{(y, 1 - g_2(y)), y \in Y\}$$

5.3 REPRESENTATION APPROXIMATIVE DES OBJETS ARCHITECTURAUX AVEC DES DISTRIBUTIONS DE POSSIBILITES

La deuxième étape du processus de modélisation est de dériver des représentations approximatives des caractéristiques typiques du bâtiment à partir des informations à la fois imprécises et incertaines contenues dans l'esquisse. Afin de préserver l'aspect flou des données disponibles avec nuance et réalisme, nous suggérons d'adopter une méthodologie basée sur l'utilisation des distributions de possibilités. Une distribution de possibilité (Zadeh, 1978; Dubois et Prade 1985) est une fonction π défini d'un univers X dans $[0, 1]$ tel que $\sup_{x \in X} \pi(x) = 1$ (normalisation). Soit V une quantité variable mesurée sur une échelle réelle et utilisée pour décrire un objet architectural. Il est possible de spécifier la valeur approximative de V par un ensemble flou en considérant une distribution de possibilités π_V . La distribution de possibilités π_V donne pour tout élément x appartenant à une échelle numérique X , le degré de possibilités $\pi(x)$ de l'événement ponctuel $V = x$.

Par exemple, si l'esquisse montre que l'angle d'obstruction A sera à peu près de 35 degrés (disons pas moins de 30 et pas plus de 40), nous pouvons définir la distribution de possibilités sur la dimension "angle d'obstruction" par :

$$\begin{aligned} \pi_A(x) &= 0 \text{ if } x \leq 30 \\ \pi_A(x) &= (x - 30)/5 \text{ if } 30 \leq x \leq 35 \\ \pi_A(x) &= (40 - x)/5 \text{ if } 35 \leq x \leq 40 \\ \pi_A(x) &= 0 \text{ if } x \geq 40 \end{aligned}$$

L'ensemble flou $A = \{(x, \pi_A(x)), x \in X\}$ est dit *conséquence floue* du projet sur la dimension "angle d'obstruction".

Dans le même sens, la conséquence du projet sur la dimension "distance à la façade en face" peut être définie par le sous-ensemble flou $D = \{(y, \pi_D(y)), y \in Y\}$. Si l'esquisse montre que D sera à peu près de 13 mètres (disons pas moins de 12 et pas plus de 14), nous pouvons définir la distribution de possibilités sur la conséquence *distance* comme :

$$\begin{aligned} \pi_D(y) &= 0 \text{ if } y \leq 12 \\ \pi_D(y) &= y - 12 \text{ if } 12 \leq y \leq 13 \\ \pi_D(y) &= 14 - y \text{ if } 13 \leq y \leq 14 \\ \pi_D(y) &= 0 \text{ if } y \geq 14 \end{aligned}$$

Ces distributions de possibilités sont représentées sur les figures 5.5 et 5.6.

5.4 DEFINITION ET AGREGATION DES NIVEAUX DE COMPATIBILITE CONSEQUENCE/OBJECTIFS

Supposons que l'objectif de l'architecte ait été spécifié sur n dimensions dont les échelles sont $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. Cette spécification est synthétisée par le vecteur flou d'objectifs partiels $G = (G_1, \dots, G_n)$ où $G = (G_1, \dots, G_n)$ où $G_j = \{(x, f_{G_j}(x)), x \in X_j\}$ pour $j \in \{1, \dots, n\}$ est le sous-ensemble flou des valeurs adéquates sur la j ème dimension. Ensuite, sur chaque dimension, nous avons défini un vecteur flou de conséquences (C_1, \dots, C_n) qui donne une représentation multidimensionnelle approximative du projet. Notre tâche est maintenant d'évaluer le niveau de compatibilité entre le vecteur des conséquences (C_1, \dots, C_n) et le vecteur des objectifs partiels (G_1, \dots, G_n) . Pour réaliser cette étape critique, nous suggérons d'adopter la procédure suivante :

- 1 - évaluer sur chaque dimension $j \in \{1, \dots, n\}$ le niveau de compatibilité partiel entre l'objectif G_j et la conséquence C_j .
- 2 - agréger les niveaux de compatibilité partiel en un indice exhaustif mesurant l'adéquation global du projet.

a) Evaluation des niveaux de compatibilité partiels

Pour $j = 1, \dots, n$, nous définissons le niveau de compatibilité conséquence/objectif k_j entre C_j et G_j par la relation suivante:

$$k_j = (1 - \alpha) \cdot \Pi(C_j, G_j) + \alpha \cdot N(C_j, G_j)$$

avec $\Pi(C_j, G_j) = \sup_{x \in X} \min(f_{G_j}(x), \pi_{C_j}(x))$

$$N(C_j, G_j) = 1 - \Pi(C_j, G'_j) = \inf_{x \in X} \max(f_{G_j}(x), 1 - \pi_{C_j}(x))$$

et $\alpha \in [0, 1]$

$\Pi(C_j, G_j)$ et $N(C_j, G_j)$ sont respectivement la *possibilité* et la *nécessité* de l'ensemble flou G_j relatif à C_j . L'indice $\Pi(C_j, G_j)$ mesure la *possibilité* de l'événement "Le projet correspond à l'objectif de l'architecte sur la dimension j " tandis que l'indice $N(C_j, G_j)$ mesure le degré de *certitude* de l'événement. Etant donné qu'un événement est toujours possible avant d'être nécessaire, $\Pi(C_j, G_j) \geq N(C_j, G_j)$ est toujours vrai. Ainsi, choisir $\alpha = 0$ entraîne des évaluations de la compatibilité très optimiste alors que choisir $\alpha = 1$ conduit à des évaluations plus pessimistes. α est donc un paramètre technique permettant de réaliser une combinaison convexe des deux indices.

Il peut être interprété comme un degré de prudence venant moduler la confiance que nous avons dans la conclusion. Regardons comment cette procédure fonctionne sur l'exemple que nous avons déjà utilisé. Sur la figure 5.5, nous avons :

$$\Pi(A, G_1) = \sup_{x \in X} \min(f_{G_1}(x), \pi_A(x)) = 0.6$$

$$N(A, G_1) = \inf_{x \in X} \max(f_{G_1}(x), 1 - \pi_A(x)) = 0.4$$

comme on le voit sur la figure 5.5.

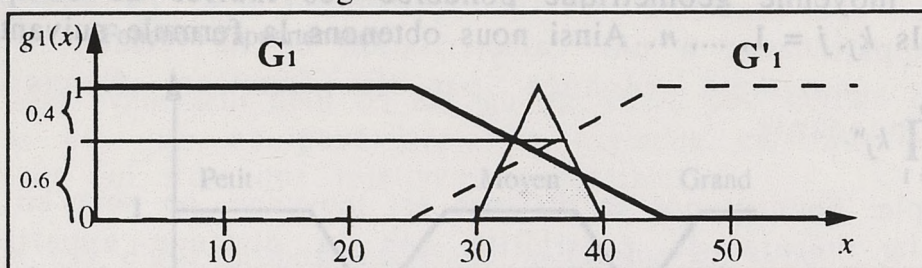


Fig. 5.5: indice de compatibilité sur la dimension "angle d'obstruction"

En choisissant $\alpha = 0,5$, on obtient : $k_1 = 0.5\Pi(A, G_1) + 0.5 N(A, G_1) = 0.5$

Donc on peut conclure que la compatibilité entre la description approximative de l'angle d'obstruction déduite de l'esquisse et l'objectif de l'architecte sur la dimension "angle d'obstruction" est moyenne. Et comme montré sur la figure 5.6, nous avons :

$$\Pi(B, G_2) = \sup_{y \in Y} \min(f_{G_2}(y), \pi_B(y)) = 0.8$$

$$N(B, G_2) = \inf_{y \in Y} \max(f_{G_2}(y), 1 - \pi_B(y)) = 0.6$$

comme on le voit sur la figure 5.6..

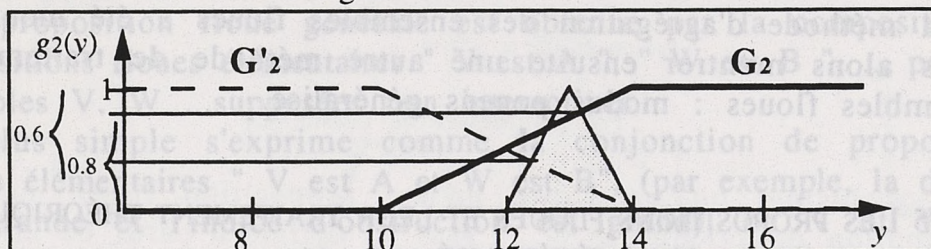


Fig. 5.6.: indice de compatibilité sur la dimension "distance"

En choisissant $\alpha = 0,5$, on obtient : $k_2 = 0.5\Pi(B, G_2) + 0.5 N(B, G_2) = 0.7$

Donc on peut conclure que la compatibilité entre la description approximative de l'angle d'obstruction déduite de l'esquisse et l'objectif de l'architecte sur la dimension "distance à la façade en face" est assez forte.

b) agrégation des niveaux de compatibilité partiels

La seconde étape consiste en la définition d'une fonction d'agrégation (voir Perny et Roy, 1992) permettant d'évaluer l'adéquation globale du projet à l'objectif de l'architecte sur la base du vecteur (k_1, \dots, k_n) . Nous suggérons de choisir un opérateur de compromis permettant de prendre en compte les effets négatifs de synergie. Cela permet de donner une mauvaise note à tout le projet dès qu'un des objectifs partiels n'est pas atteint. Ainsi, l'adéquation globale du projet est mesurée par un indice exhaustif k résultant d'une moyenne géométrique pondérée des indices de compatibilité partiels $k_j, j = 1, \dots, n$. Ainsi nous obtenons la formule suivante:

$$k = \prod_{j=1}^n k_j^{w_j}$$

où $w_j, j = 1, \dots, n$ sont des poids positifs (s'additionnant à 1). Ces poids nous permettent de moduler la contribution partielle de chaque dimension dans l'évaluation globale du projet.

Dans notre exemple, nous posons $w_1 = 0,6$ et $w_2 = 0,4$ (considérant que la dimension "angle d'obstruction" peut être légèrement plus importante que la dimension "distance à la façade en face").

Ainsi, nous obtenons : $k = 0,5^{0,6} \cdot 0,7^{0,4} = 0,572$.

Ainsi l'indice de compatibilité agrégé k suggère que l'esquisse actuel peut être considérée comme moyenne ou faiblement favorable relativement aux objectifs de l'architecte (un espace clair).

La méthode d'agrégation des ensembles flous a été montrée ici. Nous allons montrer ensuite une autre méthode de traitement des ensembles flous : modus ponens généralisé.

5.5 LES PROPOSITIONS FLOUES ET LEUR TRAITEMENT THÉORIQUE À L'AIDE DU MODUS PONENS GÉNÉRALISÉ

5.5.1. Propositions floues élémentaires.

La représentation, puis le traitement de connaissances exprimées symboliquement et non numériquement, passe par l'utilisation de variables linguistiques. On se limite à des descriptions de la forme "la distance est moyenne", "l'indice de transmission est grand".

Formellement, une proposition floue élémentaire est définie à partir d'une variable linguistique (V, X, T_V) par la qualification " V est A ".

V est une variable (par exemple, une distance, une profondeur, une intensité, ...), X est l'ensemble de référence exprimé numériquement (par exemple, les réels positifs pour l'expression d'une distance), T_V est un ensemble de sous-ensembles flous utilisés pour caractériser qualitativement la variable V .

($A \in T_V$).

Par exemple, Petit, Moyen, Grand appartiennent à T_V .

Fonction d'appartenance

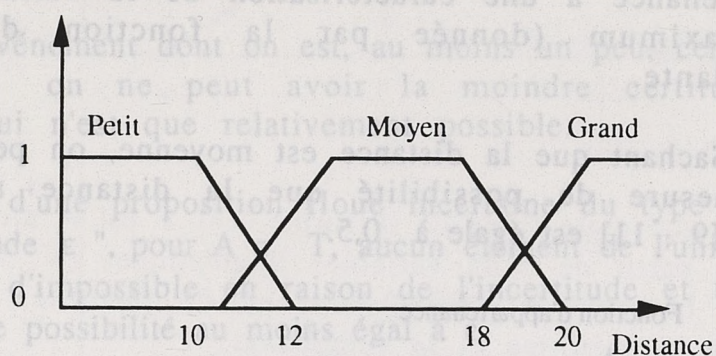


Fig 5.7 Fonction d'appartenance

A chaque qualificatif est associé une fonction d'appartenance à valeur dans l'intervalle $[0, 1]$. 1 correspond à une totale appartenance ou vérité. 0,5 correspond à un degré d'appartenance moyen ou à une valeur de vérité moyenne.

5.5.2. Proposition floue générale.

Une proposition floue générale est obtenue par la composition de propositions floues élémentaires " V est A ", " W est B ", ... pour des variables V, W ...supposées non interactives.

La plus simple s'exprime comme la conjonction de propositions floues élémentaires " V est A et W est B ", (par exemple, la distance est grande et l'indice d'obstruction est grand), où V et W sont définies sur des ensembles de référence X et Y , et elle est associée au produit cartésien $A \times B$ caractérisant la variable conjointe (V, W) sur l'ensemble $X \times Y$. Sa valeur de vérité est donc définie par $\min(\mu_A(x), \mu_B(y))$ en tout point (x, y) de $X \times Y$.

Exemple: Si la proposition floue " la distance est grande " a une valeur de vérité de 0,8 et si la proposition floue " le prospect est dégagé " a une valeur de vérité de 0,6 alors la proposition floue " la distance est grande et le prospect est dégagé " a une valeur de vérité de 0,6.

5.5.3. Distribution de possibilité associée à une proposition floue et mesure de possibilité.

5.5.3.a pour les propositions élémentaires

Nous avons vu comment pour traiter une connaissance imprécise ou vague une proposition floue permet d'associer une fonction d'appartenance à la qualification d'une variable. Il s'agit maintenant d'introduire la notion d'incertitude.

Soit un sous-ensemble non flou appartenant à X . La possibilité de son appartenance à une caractérisation de la variable V est la valeur maximum (donnée par la fonction d'appartenance correspondante).

Exemple: Sachant que la distance est moyenne, on peut en déduire que la mesure de possibilité que la distance appartienne à l'intervalle $[9, 11]$ est égale à 0,5.

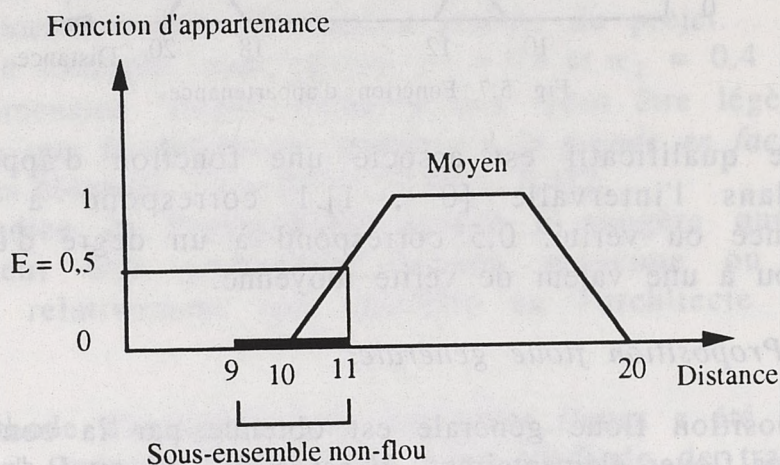


Fig 5.8 Mesure de possibilité

En conclusion, on peut dire qu'une proposition floue induit une distribution de possibilité $\Pi_{V,A}$ sur X , définie à partir de la fonction d'appartenance associée à A par :

$\forall x \in X, \Pi_{V,A}(x) = f_A(x)$ Cette définition exprime que, si ε est le degré d'appartenance d'un élément quelconque x de X à la caractérisation floue A , la possibilité pour que la variable V prenne la valeur x , sachant que V est caractérisée par A , est aussi égale à ε .

Cette distribution de possibilité permet de définir une mesure de possibilité pour toute partie non floue D de X , étant donné que V admet la caractérisation floue A : $\Pi_{V,A}(D) = \sup_{x \in D} \Pi_{V,A}(x)$.

La mesure de possibilité donne une information sur l'occurrence d'un événement mais elle ne suffit pas pour décrire l'incertitude existante sur cet événement. Pour indiquer le degré avec lequel la réalisation de l'événement est certaine, on introduit la mesure de nécessité, qui est une grandeur duale de la mesure de possibilité :

$$N_{V,A}(D) = 1 - \Pi_{V,A}(D^c).$$

Ainsi, tout événement dont on est, au moins un peu, certain est tout possible et on ne peut avoir la moindre certitude sur un événement qui n'est que relativement possible.

Dans le cas d'une proposition floue incertaine du type " X est A , avec incertitude ε ", pour $A \in T$, aucun élément de l'univers ne peut être qualifié d'impossible en raison de l'incertitude et tout élément a un degré de possibilité au moins égal à ε .

Une telle proposition est associée à la distribution de possibilité obtenue en tronquant la base de celle associée à " X est A " par une droite horizontale d'ordonnée ε , et elle est donnée par :

$$\forall x \in X, \Pi'(x) = \max(\Pi(x), \varepsilon)$$

Principaux types de propositions floues et leurs distributions de possibilité associées

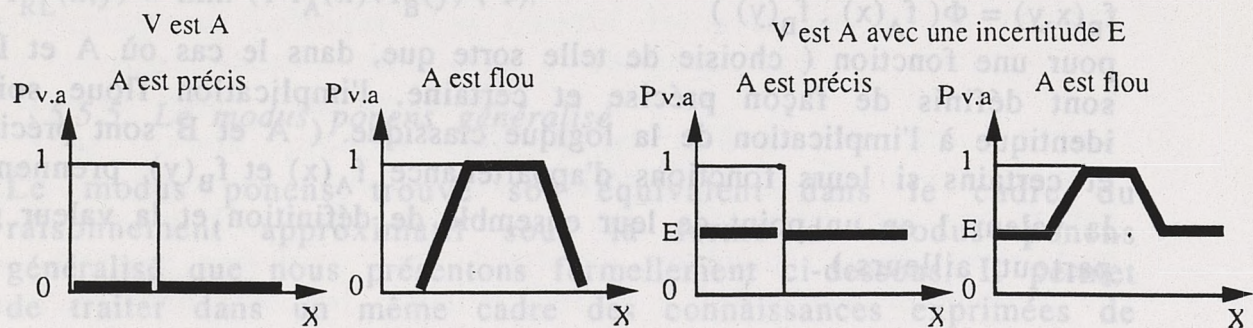


Fig 5.9 Propositions floues et distributions de possibilités associées

5.5.3.b pour les propositions générales

De la même façon, une proposition floue générale induit une distribution de possibilité sur le produit cartésien des ensembles de définition des différentes variables intervenant dans la proposition floue. Par exemple, " V est A et W est B ", avec V et W définies sur des ensembles de référence X et Y, induit la distribution de possibilité :

$$\forall x \in X, \forall y \in Y, \Pi_{(v,w), A \times B}(x,y) = \min (f_A(x), f_B(y))$$

5.5.4. Implications floues

5.5.4.a. Définition.

Considérons une règle floue de la forme " si V est A alors W est B ", construite à partir de deux variables linguistiques (V, X, Tv) et (W, Y, Tw). Le but de l'implication floue est de quantifier la force de la liaison entre la prémisse et la conclusion.

La valeur de vérité de la proposition floue obtenue par utilisation d'une implication floue entre les propositions floues élémentaires " V est A " et " W est B " est définie par la fonction d'appartenance f_R , d'une relation floue R entre X et Y. Celle-ci s'exprime, pour tout (x,y) de $X \times Y$, en fonction des fonctions d'appartenance $f_A(x)$ intervenant dans la prémisse et $f_B(x)$ dans la conclusion de la règle :

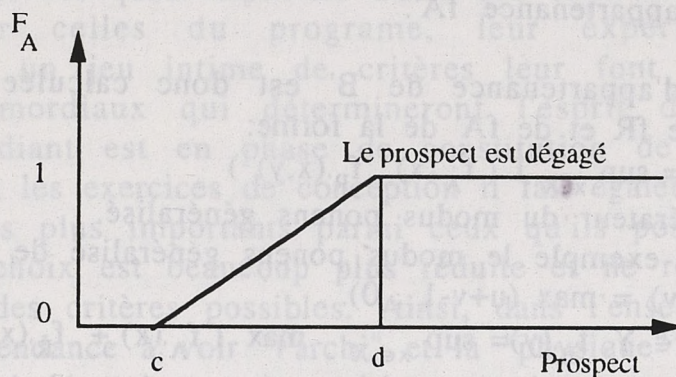
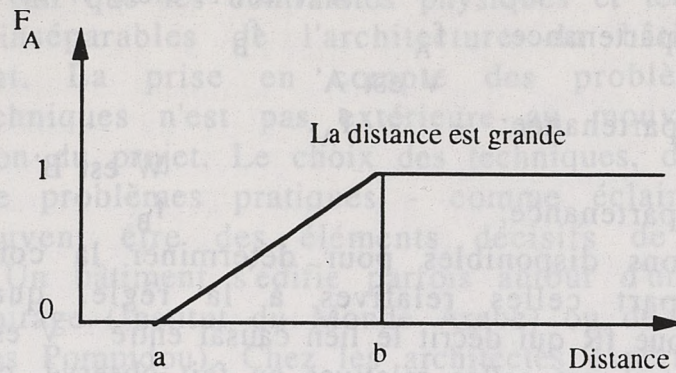
$$f_R(x,y) = \Phi(f_A(x), f_B(y))$$

pour une fonction Φ choisie de telle sorte que, dans le cas où A et B sont définis de façon précise et certaine, l'implication floue soit identique à l'implication de la logique classique. (A et B sont précis et certains si leurs fonctions d'appartenance $f_A(x)$ et $f_B(y)$ prennent la valeur 1 en un point de leur ensemble de définition et la valeur 0 partout ailleurs.)

5.5.4.b. Les implications floues

Exemple d'implication floue:

Si la distance est grande alors le prospect est dégagé.



Il existe plusieurs sortes de fonctions pour traduire l'implication floue. Prenons comme exemple de fonction, l'implication floue de Lukasiewicz, qui généralise l'implication de la logique classique:

$$f_{RL}(x,y) = \min(1 - f_A(x) + f_B(y), 1).$$

5.5.5. Le modus ponens généralisé

Le modus ponens trouve son équivalent dans le cadre du raisonnement approximatif sous la forme du modus ponens généralisé que nous présentons formellement ci-dessous. Il permet de traiter dans un même cadre des connaissances exprimées de façon symbolique et des données purement numériques. Il permet également de tenir compte de l'aspect graduel des caractérisations floues (si la donnée est très proche de la prémisse de la règle, la conclusion sera très proche de la conclusion de la règle).

De façon générale, les conditions d'utilisation du modus ponens généralisé sont les suivantes (on considère des propositions floues élémentaires pour simplifier mais le même schéma s'applique au cas de propositions floues générales) :

Règle floue: si V est A alors W est B
 Fonctions d'appartenance: f_A f_B
 Fait observé: V est A'
 Fonction d'appartenance: $f_{A'}$
 Conclusion: W est B'
 Fonction d'appartenance: $f_{B'}$

Les informations disponibles pour déterminer la conclusion sont donc d'une part celles relatives à la règle, quantifiées par l'implication floue f_R qui décrit le lien causal entre " V est A " et " W est B ", d'autre part celles relatives au fait observé, quantifiées par la fonction d'appartenance $f_{A'}$.

La fonction d'appartenance de B' est donc calculée comme une combinaison de f_R et de $f_{A'}$ de la forme:

$$\forall y \in Y, f_{B'}(y) = \sup_{x \in X} T (f_{A'}(x), f_R(x,y))$$

où T est l'opérateur du modus ponens généralisé.

Donnons pour exemple le modus ponens généralisé de Lukasiewicz:

$$T_{\text{Lukasiewicz}}(u,v) = \max(u+v-1, 0).$$

$$\text{On a donc: } \forall y \in Y, f_{B'}(y) = \sup_{x \in X} \max (f_{A'}(x) + f_R(x,y) - 1, 0)$$

Conclusion

Dans la démarche de maîtrise des ambiances dans l'enseignement des futurs architectes, il est important de favoriser la prise de conscience du fait que les contraintes physiques et techniques sont des notions inséparables de l'architecture du bâtiment et de l'environnement. La prise en compte des problèmes et des contraintes techniques n'est pas extérieure au mouvement même de la conception du projet. Le choix des techniques, des matériaux, la solution de problèmes pratiques - comme éclairer, chauffer, ventiler - peuvent être des éléments décisifs de l'inspiration architecturale. Un bâtiment s'édifie parfois autour d'une conception neuve de l'éclairage (Institut du Monde Arabe) ou de la ventilation (Centre Georges Pompidou). Chez les architectes expérimentés, cette prise en compte est quasi-implicite. Outre des contraintes explicites, en particulier celles du programme, leur expérience, leurs connaissances, un jeu intime de critères leur font détecter des impératifs primordiaux qui détermineront l'esprit du projet. A l'inverse, l'étudiant est en phase de constitution de ses propres critères. Durant les exercices de conception il fait également le choix des critères les plus importants parmi ceux qu'ils possèdent. Mais leur base de choix est beaucoup plus réduite et ne représente pas une synthèse des critères possibles. Ainsi, dans l'enseignement, les étudiants ont tendance à voir "l'archi" et la "physique" comme deux enseignements indépendants: des critères pertinents pour un cours de thermique ne le seront tout à coup plus dans la conception d'un projet. Nous souhaitons donc aider les étudiants à créer leur propres critères et à réaliser la synthèse indispensable entre architecture et technique. Cet objectif recouvre un certain nombre des questions d'ordre théoriques et méthodologiques que nous avons essayé de traiter dans ce projet.

Nous avons premièrement décrit l'évolution des objets architecturaux, en explorant particulièrement leur nature imprécise et incertaine. Les interviews auprès des architectes nous ont permis de détecter certaines caractéristiques communes dans l'évolution de l'objet architectural (relative surtout à l'ambiance lumineuse) en dépit de la grande variété des processus de conception.

Tout d'abord et contrairement à ce qui est souvent décrit, l'architecte, dans sa démarche de synthèse, ne prend pas en compte simultanément l'ensemble des aspects du projet. Il effectue un certain nombre de choix en fonction de critères personnels. Ces critères sont liés à la fois à sa personnalité et aux caractéristiques du projet, ils varient naturellement d'un projet à l'autre. Ceux-ci

étant définis, l'architecte approfondit, en premier lieu, la définition des objets liés à ces critères.

Au sein de ce processus, nous avons identifié trois groupes d'objets dont les rôles sont différents. Cette constatation a été très importante pour permettre une structuration pertinente des méthodes d'évaluation du projet. En effet, les méthodes doivent être structurées autour d'objets appartenant si possible au même groupe ou à défaut autour d'un nombre minimum d'objets. Pour ce faire, nous avons créé une structure d'objets de bâtiment pour le point de vue d'ambiance lumineuse. Il convient de remarquer que le modèle flou de bâtiment que nous avons amorcé ici est compatible avec les modèles de référence dans sa partie générique (objet-relation-objet). Le caractère flou de cette structure n'apparaît que dans la relation attribut-valeur, c'est-à-dire dans sa partie spécifique.

Nous avons également remarqué au cours des interviews (section 3) qu'il y a dans le processus de conception une alternance de phases de création et de validation. Cette remarque nous a conforté dans l'idée qu'un outil de validation, qui facilite un "temps d'arrêt" dans la conception, ne vient pas bloquer l'élan de l'architecte mais que, bien inséré, il s'intègre naturellement dans la conception. D'autre part, vis à vis des étudiants, cet outil ne crée donc pas un temps de validation artificiel mais il reflète un processus naturel chez l'architecte.

Ce travail d'analyse sur la conception a été un préalable indispensable à l'étude de l'ambiance lumineuse et en particulier à la structuration des méthodes en éclairage naturel. Tout d'abord, il faut noter que la notion d'ambiance lumineuse est essentiellement subjective, c'est-à-dire que l'architecte peut avoir des intentions très diverses et que des règles qui préjugeraient de ce qui est bon ou mauvais ne peuvent être appropriées. De ce fait, nous avons mis en place une évaluation de l'ambiance lumineuse dans le projet par rapport aux intentions exprimées de l'architecte.

D'autre part, l'étude des méthodes classiques montrent que les langages des ingénieurs-experts et des architectes sont différents. Aussi pour faciliter la communication entre leur deux approches, nous avons créé une structure de critères d'évaluation de l'ambiance lumineuse dans un langage qui soit partagé à la fois par l'éclairagiste et par l'architecte (section 4). Ce point de rencontre permet de structurer les méthodes en éclairage mais également de les expliquer à l'architecte. De plus, nous avons montré comment on peut créer, à partir de cette structure de base d'autres structures qui permettent d'évaluer l'ambiance lumineuse de points de vues spécifiques à l'architecte (comme le dynamisme par exemple).

Dans ce travail, l'apport des interviews a été important. En effet, elles nous ont montré qu'il est nécessaire que ces structures

d'évaluation soient progressives, c'est-à-dire qu'elles intègrent au fur et à mesure de l'avancée de la conception les nouvelles informations disponibles. Elles ont, en outre, montré la multiplicité des points de vues possibles ce qui nous a conduit à créer une structure souple ou de nouvelles agrégations sont toujours possibles pour prendre en compte de nouveaux points de vue.

Enfin, nous avons porté notre attention sur le traitement de l'imprécision des objets architecturaux. Nous avons posé comme hypothèse et cela a été confirmé au fil des interviews que certains objets sont, en général, d'abord définis de manière imprécise ce qui empêche les méthodes actuelles et la quasi-totalité des systèmes informatiques existants de fonctionner en phase d'esquisse. L'utilisation de la logique des ensembles flous nous a permis de traiter ce problème et de tirer des conclusions sur l'ambiance lumineuse malgré les imprécisions dans la définition des objets (section 5).

Ce travail n'est, bien entendu, pas achevé. De nombreuses voies de recherche sont encore à approfondir, nous souhaitons donner ici quelques perspectives qui nous paraissent particulièrement intéressantes.

En conception architecturale, il serait intéressant de se concentrer plus sur l'étude du moment de choix des critères en s'appuyant sur les travaux réalisés en psychologie cognitive pour éclairer le passage Objet intentionnel--> Objet axiologique --> Objet physique. Cela permettrait de mieux comprendre comment s'effectue ce choix de critères et d'intégrer d'autres méthodes mathématiques qui aideront la conception de l'ambiance lumineuse.

Il convient, bien entendu, d'étendre ce travail à d'autres champs techniques. Il serait, par exemple, intéressant d'étudier d'autres domaines et de voir comment ceux-ci interagissent avec l'éclairage naturel. Nous avons esquissé cette approche mais elle mérite d'être approfondie.

Enfin, à long terme, il peut être intéressant d'étudier les possibles apports des travaux de recherche actuels sur les versions de bases de données et les bases de données orientées-objets qui permettent de conserver dans une même base les différents états d'un objet de façon dynamique. Cela permettrait peut être de faciliter la conception d'un système global allant de l'esquisse à l'APD mais également capable de revenir en arrière dans des niveaux de définition du projet antérieurs..

Bibliographie

- Bouchon-Meunier, B.: 1993, "La logique floue", PUF.
- Boudon, P.: 1991, De l'architecture à l'épistémologie, PUF.
- Boudon, P.: 1992, Introduction à l'architecturologie, DUNOD.
- Conan, M.: 1990, Concevoir un projet d'architecture, L'Harmattan.
- Dombi, J.: 1982, Basic concepts of a theory of evaluation : the aggregative operator, *European Journal of Operational Research*, **10**, 282-293.
- Dubois, D. and Prade H.: 1985, Théorie des possibilités, Masson.
- Dupagne, A : 1989, Développements d'outils de simulation liés à la méthode architecturale, communication n° : II 2, AFME, Sophia-Antipolis.
- Evans, B. H.: 1981, Daylighting in architecture, Mac-Graw Hill.
- Farel, A.: 1991, Architecture et complexité, Les éditions de la passion.
- Fontoynt, M. : 1988, Besoin en éclairage, in *Energétique des bâtiments*, R. Dehausse, PYC éditions, Paris.
- Hanrot, S.: 1989, "Modélisation de la connaissance architecturale pour un outil de CAO intelligent", *Plan Construction et Architecture*.
- Heath, T.: 1993, "Social aspects of creativity and their impact on creativity modeling", in *Modeling creativity and creative design*, J. Gero eds, Lawrence-Erlbaum.
- Holton, G.: 1981, L'imagination scientifique, Gallimard.
- Hopkinson., R.G.: 1963, *Architectural Physics : Lighting*, Her Majesty's Stationery Office.
- Iwata, T. & al: 1991, "Subjective response on discomfort glare caused by windows", CIE 22nd session.
- Lam, W.M.C.: 1986, *Sunlighting as a formgiver for architecture*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Lebahar, J.C.: 1983, *Le dessin de l'architecte*, Marseille Parenthèses.
- Mitchell, W. J.: 1991, *Functional grammars : an introduction*, working paper.
- Mudri, L.: 1991, "Communication between knowledges in a CAD program, proceedings workshop Aix-Les-Bains.
- Oxman, R., Radford A., and Oxman R.: 1987, *Language of architectural plans*", Royal Australian Institute of Architects Education Division.
- Piano, R.: 1986, *Piano, L'architecture d'aujourd'hui*, 246.
- Prost, R.: 1992, *Conception Architecturale*, L'Harmattan.
- Robert, J., Parent, C.: 1988, "Conception architecturale et énergie, in *Energétique des bâtiments*, R. Dehausse, PYC Editions, Paris.
- Roll, K.F., Hentschell, H.J.: 1987, "Luminance patterns in interiors and balanced perception", in *proceedings CIE VENEZIA*, Venise.
- Rosenman, M.A., Gero, J.S. and Oxman R.E.: 1991, What's in a case : the use of case bases, knowledge bases and databases in design, in the *CAAD futures'91 proceedings*, edited by Schmitt G.N..
- Satoh, M. & al.: 1987, "Effects of visual environmental factors on atmosphere of a control room in a power plant", in *proceedings CIE VENEZIA*, Venise.
- Zadeh, L.A.: 1978, Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy sets and systems*, **1**, 3-28.
- Zadeh, L.A.: 1986: Fuzzy sets, *Information and Control*, **8**, 338-353.

ANNEXES

1. Qu'est-ce que la lumière?
2. Que disent les architectes...
(extrait des interviews)

SOMMAIRE

1. Introduction	4
OPTIQUE ET CHAMBRE NOIRE	5
2. Propagation rectiligne de la lumière - camera obscura	5
2.1 PROJECTION - JEUX D'OMBRE	5
2.2 REFLEXION - JEUX DE MIROIR	10
2.3 REFRACTION - AUTOUR D'UNE BOULE DE CRISTAL ET AUTRES DIOPTRES	11
2.3.1 Des tables de Witelo au principe de Fermat en passant par la loi de Snell-Descartes	13
2.3.2 Couleurs de la lumière	14
3. Theories corpusculaires et théories ondulatoires de la lumière	15
3.1 HÉSITATIONS ENTRE THÉORIE ONDULATOIRE ET CORPUSCULAIRE	16
3.1.1 Intérférence	
3.1.2 Diffraction	
3.3.3 Polarisation	
3.2 LA THÉORIE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DE LA LUMIÈRE	19
3.3 LE PROBLÈME DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ET LA NAISSANCE DE LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE	19
3.4 CARACTÈRE ONDULATOIRE ET CORPUSCULAIRE DE LA LUMIÈRE : LA MÉCANIQUE QUANTIQUE	20
4. Bibliographie	21

1. Introduction

Qu'est ce que la lumière? De quoi parlent les gens lorsqu'ils parlent de la lumière? Cela peut-il continuer à m'intéresser si je deviens aveugle? Et si oui, de quelle façon? En quoi pourrais-je alors, ne serait-ce qu'indirectement, être affecté par les phénomènes lumineux? Pourrais-je les détecter? Si j'étais aveugle de naissance, y aurait-il quelque chose à concevoir pour moi dans ce domaine.

Pour essayer de penser à l'expérience de la lumière, des théoriciens, physiciens, mathématiciens et philosophes, ont tenté d'imaginer la situation d'un aveugle; Descartes¹, puis Diderot² par exemple. Mais n'est-ce pas la même curiosité qui pousse les enfants à jouer à Colin-Maillard? Est-ce la même lumière dont parle l'expérience courante et dont parlent les physiciens? Mais les physiciens parlent-ils tous de la même lumière? Quelqu'un a-t-il jamais vu la lumière dont parlent les physiciens?

¹"Il vous est bien, sans doute, arrivé quelquefois, en marchant de nuit sans flambeau ... qu'il fallait vous aider d'un bâton pour vous conduire, et vous avez pour lors pu remarquer que vous sentiez, par l'entremise de ce bâton, les divers objets qui se rencontraient autour de vous...

Il est vrai que cette sorte de sentiment est un peu confuse et obscure, en ceux qui n' en ont pas un long usage; mais considérez la en ceux qui étant nés aveugles, s'en sont servis toute leur vie, et vous l'y trouverez si parfaite et si exacte, qu'on pourrait quasi-dire qu'ils voient des mains, ou que leur bâton est l'organe de quelque sixième sens qui leur a été donné à défaut de la vue. Et pour tirer une comparaison de ceci, je désire que vous pensiez que la lumière n'est autre chose, dans les corps qu'on nomme lumineux, qu'un certain mouvement ou une action fort prompte et fort vive, qui passe vers nos yeux, par l'entremise de l'air et des autres corps transparents, en même façon que le mouvement ou la résistance des corps, que rencontre cet aveugle, passe vers sa main, par l'entremise de son bâton (La dioptrique, discours premier, Ed la Pléiade, Descartes Oeuvres et lettres p 181,182)

²"Lettre sur les aveugles à l'usage de ceux qui voient" p 841 Diderot Oeuvre Ed La Pléiade

OPTIQUE ET CHAMBRE NOIRE

Peut-être ces questions perdent-elles beaucoup de leur intérêt si l'on se rend compte que, bien avant de parler de lumière, il convient de distinguer dans l'expérience globale que notre espèce se reconnaît dans la réalité, avec toute l'illusion que cette expérience comporte, un aspect que l'on pourrait appeler : expérience de la lumière.

Le jour et la nuit. Sans doute, ce qui stimule une première distinction, qui n'est pas encore celle de la lumière, c'est la rotation de notre planète qui produit l'opposition du jour et de la nuit. Pourtant cette opposition est purement subie.

Eclairer et obscurcir. Tout autre chose est de produire du jour quand il fait nuit, tout simplement en allumant un feu, ce qui n'est pas simple et inaugura une ère dans l'histoire de l'espèce; mais aussi de réaliser l'obscurité en plein jour, en s'enfermant dans une enceinte.

Habiter l'ombre et la lumière. Cette façon de faire connaissance avec le réel en s'y opposant, c'est de la pratique et de l'expérimentation. "Habiter" est le nom d'une entreprise qui passe par cette pratique, dans la mesure où une maîtrise de l'obscurité et de la lumière se cherche, qui permette à de la vie de s'installer dans des conditions d'existence, de pouvoir les examiner, les changer, y rêver, y penser.

2. Propagation rectiligne de la lumière- Camera obscura

2.1 PROJECTION - JEUX D'OMBRE

Caverne illuminée. Longtemps avant que quiconque ait la moindre notion de ce que pourrait être "la physique", le dispositif expérimental qui devait servir de point de départ à l'optique s'est trouvé réalisé spontanément dans une des situations pratiques les plus archaïques : s'enfermer dans une enceinte dont la paroi opaque est percée d'une petite ouverture au travers de laquelle pénètre un faisceau de lumière solaire. Ainsi, après avoir fait la nuit en plein jour, on fait du jour dans cette nuit.

Faisceau fantôme. Encore convient-il de remarquer que si l'enceinte est parfaitement dépoussiérée, ce faisceau est invisible. C'est seulement l'éclairage des obstacles qui s'interposent sur le "trajet lumineux" qui manifeste que quelque chose est à prendre en

considération, et qu'il convient d'ouvrir un certain dossier pour recueillir un mélange encore confus d'impressions et de fantasmes. "Lumière" est l'étiquette donnée à ce dossier. C'est donc plus le nom d'une enquête que d'une réalité.

L'attention divisée. Il ne suffit pas de réaliser les conditions d'une expérience aussi sommaire que celle d'une chambre noire pour y reconnaître ce qu'il serait intéressant de prendre en considération¹. Dans le cas qui nous occupe, l'intérêt se trouve immédiatement disputé entre deux sollicitations.

Jeux de lumière ou danse des poussières? Nous pouvons bien nous laisser fasciner par la découverte du faisceau lumineux, de son éclat, de la pureté de sa forme. Cette fascination risque de se décomposer à un examen plus minutieux. C'est une foule de minuscules scintillements livrés à une agitation incessante qui avait produit notre impression de faisceau lumineux. Il n'y a pas de faisceau, seulement une danse désordonnée d'une multitude de poussières brillantes. Si nous poussons notre enquête dans cette direction, nous risquons d'abandonner pour longtemps le domaine aujourd'hui répertorié comme "optique" ou "théorie de la lumière" ou "théorie des radiations" pour investir le terrain "théorie des corpuscules, atomes, molécules, particules élémentaires", "théorie cinétique des gaz", "théorie du mouvement brownien".

Poussière et atomisme. Historiquement, Lucrèce se faisant l'interprète latin du penseur atomiste Grec Epicure, a décrit dans son poème l'observation du mouvement chaotique des poussières, possible chaque fois qu'un faisceau de lumière pénètre dans un espace obscur (voir Lucrèce)².

¹ "Car Bacon, qui parlait sans cesse d'observation à faire, n'oubliait qu'une seule chose, pourtant essentielle : la nécessité de porter d'abord un jugement sur ce qui vaut la peine ou non d'être observé, sur ce à quoi il faut prêter attention" Voir Feynmann, La nature de la physique, p 213 Ed du Seuil

² "Regarde, en effet, quand la lumière du Soleil fait pénétrer un faisceau de rayons dans l'obscurité de nos maisons : tu verras une multitude de corpuscules s'entremêler de mille façons à travers le vide dans le faisceau lumineux et, comme soldats d'une guerre éternelle, se livrer combats et batailles, guerroyer par escadrons, sans trêve, et ne cessant fiévreusement de se joindre et de se séparer; tu peux te figurer par là ce qu'est l'agitation sans fin des atomes dans le grand vide, autant toutefois une petite chose peut on représenter une grande et nous guider sur la trace de sa connaissance.

Une autre raison d'observer attentivement les corpuscules qui s'agitent en désordre dans un rayon du soleil, c'est qu'une telle agitation nous révèle les mouvements invisibles auxquels sont entraînés les éléments de la matière car

Si nous essayons de suivre la trajectoire d'une particule brillante, notre surveillance devra être assez vive pour ne pas se laisser déjouer par de soudains changements de cap ni égarer par des ressemblances; mais nous n'éviterons pas une soudaine disparition lorsque la lumière qu'elle nous envoyait ira se perdre dans une autre direction. Même si elle recommençait à nous atteindre de ses messages, il est peu vraisemblable que nous ayons le moyen de la reconnaître par une identification quelconque.

Géométrie et lumière. Supposons que nous soyons lassés de notre filature. Ce que nous avons gagné dans notre enquête sur la poussière, c'est une désillusion : nous ne croyons plus à la réalité du faisceau lumineux. Il n'en reste pas moins que cette illusion nous a fait imaginer des formes d'une pureté et d'une perfection que l'expérience réelle nous présente rarement, et la plupart du temps à travers le dispositif d'autres illusions, l'arc en ciel par exemple, ou la ligne de l'horizon.

Historiquement, dans une des traditions que se reconnaît la science contemporaine, c'est *au même* Euclide (troisième siècle avant Jésus-Christ, invité par le premier Ptolémée à enseigner à Alexandrie) qu'est attribuée la rédaction des *Eléments* (de géométrie), un texte où les mathématiques se présentent comme une suite de démonstrations obéissant à la règle d'un jeu rigoureux, jeu qui comporte la déclaration préalable d'un nombre fini d'axiomes; mais aussi d'un traité d'optique et de catoptrique (science des miroirs) qui développe la théorie de la propagation rectiligne de la lumière. L'idée de la droite géométrique possède une de ses origines dans la fiction du rayon lumineux, fiction qui entretient un rapport vraisemblable avec l'expérience du faisceau lumineux découvert dans une enceinte et l'expérience de la désillusion concernant la réalité du faisceau. La géométrie telle

souvent tu verras beaucoup de ces poussières, sous l'impulsion sans doute de chocs imperceptibles, changer de direction, rebrousser chemin, tantôt à droite, tantôt à gauche et dans tous les sens. Or, leur mobilité tient évidemment à celle de leurs principes.

Les atomes, en effet se meuvent les premiers par eux-mêmes; c'est ensuite au tour des plus petits corps composés : les plus proches des atomes par leur force; sous leurs chocs invisibles ils s'écroulent, se mettent en marche et eux-mêmes en viennent à déplacer des corps plus importants. C'est ainsi que par des atomes le mouvement qui s'élève toujours et parvient peu à peu à nos sens, pour parvenir enfin à la poussière que nous apercevons dans les rayons du soleil, alors même que les choses qui la mettent en mouvement nous demeurent invisibles." (De la nature, trad Henri Clouard Ed. G F Flammarion

qu'Euclide nous la transmet est le premier exemple d'un discours rigoureux sur une fiction, c'est-à-dire d'une élaboration mathématique.

Le cabinet d'optique. Pour en finir avec ces premières illusions d'optique, même rêvées rigoureusement par la géométrie comme le jeu des droites, des plans et des points, on peut concentrer son attention sur l'une des extrémités du faisceau : sur la paroi qui l'intercepte et où resplendit une tache lumineuse, ou sur l'orifice de notre cavité noire (voir note page A-6).

Si nous trouvons le moyen de faire varier cette ouverture, en redécouvrant par exemple le principe du rideau (mais il y a ici un tout autre chapitre de la rêverie pratique-expérimentale de l'humanité, le chapitre des "portes et fenêtres") nous observons une variation corrélative de la tache lumineuse.

On peut dire que ce dispositif constitué d'une chambre noire percée d'une ouverture pouvant être partiellement obstruée et au travers de laquelle la lumière pénètre sous la forme d'un faisceau (cette ouverture réglable, dans ce contexte est un diaphragme), faisceau qui est intercepté par une des parois de la chambre (et cette paroi est nommée écran), ce dispositif est déjà un cabinet d'optique dans la mesure où il est loisible d'interposer sur le trajet lumineux toutes sortes d'autres dispositifs expérimentaux, ici essentiellement des dioptries, des miroirs, de nouveaux diaphragmes et de nouveaux écrans.

Bien sûr, les réflexions de la géométrie seront assimilées dans la conception de ce cabinet. En général, l'écran sera "plan". La plupart du temps, il sera désolidarisé de la cloison proprement dite de la paroi. L'ouverture du diaphragme aura elle aussi des formes sur lesquelles la géométrie a son mot à dire, par exemple elle sera "circulaire" ou bien sera constituée d'une fente "rectangulaire", ou bien encore se présentera comme un polygone régulier, qu'une très ancienne ruse géométrico-mécanique pourra contracter ou dilater dans une articulation de solides.

Parenthèse sur un premier théâtre d'ombres. On peut remarquer que le cabinet d'optique, ce théâtre de l'expérimentation de l'ombre, de la lumière et de la vue, pourrait tout aussi bien servir de pur et simple théâtre d'ombres. Il suffit d'observer sur l'écran, non pas la tache lumineuse mais l'ombre d'un objet quelconque, qu'on peut toujours réduire à être plan sans modifier la forme de l'ombre, et qu'on peut placer au milieu du diaphragme. Ainsi, on fait de l'ombre au milieu de la lumière dont on a troué

cette obscurité qu'on a réalisée en plein jour. Dans le cinéma, ou plus exactement dans la projection cinématographique, il y a cette idée, mais il y a aussi l'idée de l'intermittence temporelle de l'ombre et de la lumière, et de l'illusion du mouvement continu à partir de la séquence discrète de vues. Cette dernière idée, dégagée de toute complaisance esthétique est mise en oeuvre dans la stroboscopie.

Retour sur la naissance commune de l'optique et de la géométrie. Les jeux de l'ombre et de la lumière, c'est à dire en fait les conséquences tirées de la propagation rectiligne de la lumière, c'est aujourd'hui un chapitre de ce qu'il est convenu d'appeler l'optique géométrique dont nous allons développer le sommaire dans ce qui suit. Cette optique donne les formules de la position d'une image en fonction de la position d'un objet, du grossissement effectué par un dispositif optique. Et on l'oppose à l'optique physique, qui, à partir d'expériences qui limitent, du reste, la validité de l'optique géométrique (en optique géométrique on doit réaliser un série de diaphragmations limitant l'inclinaison des rayons lumineux par rapport à l'axe du dispositif; mais on doit éviter aussi que la diaphragmation donne lieu à des phénomènes de diffraction; on devrait aussi, idéalement, procéder avec une lumière monochromatique pour éviter les phénomènes de dispersion, etc...) met en évidence des propriétés de la lumière autres que cette propagation rectiligne.

Tout suggère qu'il y a une naissance commune de la science géométrique et de la science optique. Dans cette perspective, l'optique géométrique ne serait pas ce qui s'oppose à l'optique physique. Ce serait ce chapitre de la science où la physique de l'optique et physique de la géométrie naissent ensemble dans les mêmes expériences pour progressivement se distinguer et se détacher.

2.2 RÉFLEXION - JEUX DE MIROIRS

Les accessoires élémentaires du cabinet d'optique

Histoire de miroirs. L'eau calme d'un étang ou même d'une flaque d'eau offre l'expérience de la réflexion, bien avant que des matériaux et des pratiques soient découverts capable de produire une surface solide et réfléchissante. Bien avant que la réflexion soit comprise comme rebondissement d'un jet de lumière, c'est le problème de la reconnaissance d'une image en tant que telle qui a dû être résolu, et d'après certaines écoles de psychologues ce n'est

qu'à partir d'un certain stade de développement que le jeune enfant se reconnaît dans l'image qui lui est renvoyée par un miroir. D'une façon beaucoup mieux comprise, mais nullement triviale, c'est la géométrie qui a explicité, dans la théorie de la symétrie plane, le phénomène du renversement d'orientation qui oppose un objet à son image dans le miroir.

Le miroir plan. Si, dans une chambre obscure, nous projetons un faisceau cylindrique de lumière sur une surface réfléchissante (la surface d'un liquide transparent au repos, une section plane d'un bloc de verre, la surface plane et polie d'un solide métallique) nous pouvons observer un autre faisceau lumineux cylindrique en provenance de ce miroir. Appelons "faisceau réfléchi" ce dernier faisceau et "faisceau incident" le faisceau initial. Il s'avère que le faisceau réfléchi prolonge exactement ce qui serait le symétrique du faisceau incident par rapport au plan du miroir.

Une autre façon de dire la même chose, en admettant qu'on puisse isoler un rayon lumineux dans le faisceau (ou qu'en diminuant considérablement la section du faisceau on puisse s'approcher de l'idéal d'un rayon lumineux) : le rayon incident et le rayon réfléchi sont symétriques par rapport à la normale au plan du miroir au point d'incidence.

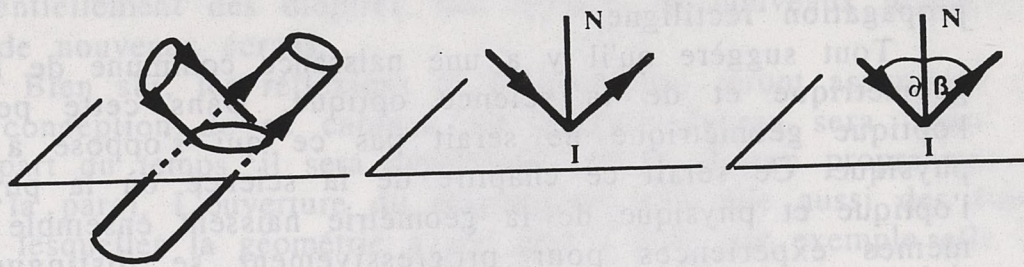


Fig. 1 Incidences

Un dernier énoncé : appelons angle d'incidence (respectivement angle de réflexion) l'angle du rayon incident (respectivement du rayon réfléchi) avec la normale au plan du miroir : ces deux angles sont opposés.

Toute l'optique des miroirs peut se déduire de la géométrie d'Euclide, de cette loi et de la loi de propagation rectiligne de la lumière. Et cette théorie a été rigoureusement développée dans le traité attribué à Euclide "optique et catoptrique". Il est remarquable que sans diaphragmation toute source lumineuse fournisse une image absolument nette dans un miroir plan. Aucun autre dispositif optique ne donne d'image nette sans diaphragmation.

Le miroir plan est un accessoire fondamental du cabinet d'optique au moins pour une raison : il permet de changer à volonté la direction d'un faisceau de lumière. Il faut noter, en anticipant sur ce qui suivra à propos de la polarisation, que la lumière réfléchie par un miroir n'a plus toutes les propriétés de la lumière provenant du soleil ou d'une "lampe" quelconque : elle est polarisée, ce qui peut impliquer dans certains cas que si nous l'interceptons une seconde fois par un autre miroir, il y ait extinction du faisceau deux fois réfléchi. Les miroirs sphériques, convexes ou concaves permettent, eux aussi, de former des images dont la géométrie est parfaitement comprise.

2.3 RÉFRACTION - AUTOUR D'UNE BOULE DE CRISTAL ET AUTRES DIOPTRÉS.

Une optique de la réfraction s'est avérée bien plus délicate à dégager que l'optique de la propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène et isotrope unique et de la réflexion par des miroirs, qui a trouvé une expression scientifique dès l'époque d'Euclide.

Ce n'est pas que des phénomènes qui en relèvent, de notre point de vue, n'aient pas été remarqués très tôt. L'arc en ciel était une énigme de même que le prolongement brisé d'un bâton obliquement immergé dans l'eau (ou celui du fil du pêcheur).



Fig. 2 Réfraction

Et dès le 11^{ème} siècle, le savant arabe Ibn Al Haytam (965-1039), qui divise l'optique en trois disciplines (optique géométrique, optique physique et optique physiologique) traite de la réfraction en tentant une explication qualitative, qui sera reprise et précisée par Descartes : tout corps diaphane, dit-il, lorsque la lumière le traverse lui oppose une petite résistance qui dépend de la structure du corps (Pour Descartes, au cours de la pénétration de la lumière dans la substance transparente, la composante perpendiculaire au plan de la surface de séparation est accélérée ou retardée tandis que la composante parallèle à cette même surface est inchangée).

A la même époque, dans la Chrétienté, des lentilles de verre sont fabriquées qui servent de loupe, et à Venise et Florence la production systématique de binocles (deux lentilles cerclées de plomb et assemblées) est entreprise au XIII^{ème} siècle, et leur diffusion s'étend en Europe, dans le monde islamique et en Chine. Ces inventions techniques suscitent la théorie. Des penseurs comme Robert Grosse Tête (1168-1253), Roger Bacon (1214-1294) posent les problèmes, envisagent la création de lunettes télescopiques, tentent une explication de la structure de l'oeil. Thierry de Freiberg, à qui l'on doit une belle théorie de l'arc en ciel, s'occupe aussi de la réfraction.

2.3.1 *Des tables de Witelo au principe de Fermat en passant par la loi de Snell-Descartes.* C'est Witelo (1230-1300) qui effectue un travail décisif¹ (qui, développé par les générations successives, permettra à Snell et Descartes de donner une version condensée des lois de réfraction) : il dresse des tables de correspondance entre angle d'incidence et angle de réfraction pour un rayon lumineux traversant une surface plane séparant deux milieux transparents (un "dioptré plan") selon la nature des milieux traversés. Ces tables sont destinées à fournir aux artisans opticiens un instrument d'élaboration rigoureux

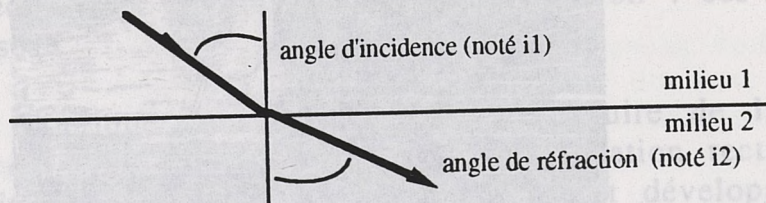


Fig. 3 (S-D)

¹(voir Maitte, 1981, p 34)

Il va falloir attendre le 17^{ème} siècle pour que Snell et Descartes traduisent l'expression de ces tableaux sous la forme condensée :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad \text{équation de Snell-Descartes (S-D)}$$

où les constantes n_1 et n_2 ne dépendent chacune que de la nature respective du milieu (1) et du milieu (2). Avec ces notations, on peut convenir que $n_1 = 1$, si le milieu (1) est le vide. En général, on décide d'appeler "indice d'un milieu i " la constante correspondante n_i .

Cette formulation recouvre deux découvertes :

- le rapport $\sin i_1 / \sin i_2$ est une constante pour un dioptre donné.
- si l'on considère un succession de deux dioptres,

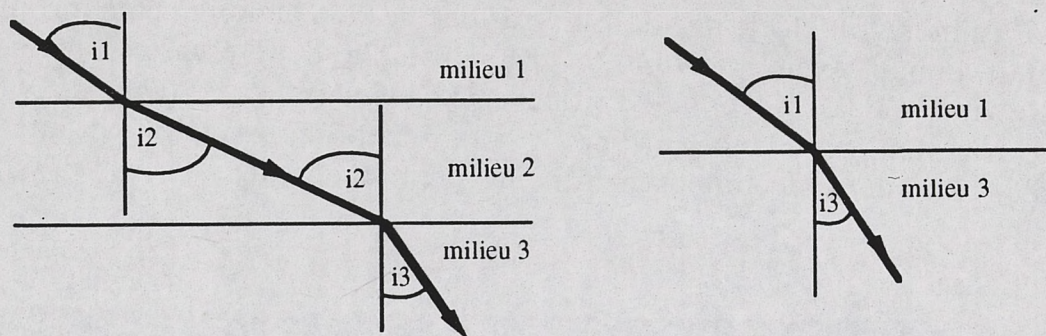


Fig. 4 (S-D)

la correspondance qui à i_1 associe i_3 est la même que celle qui régit un dioptre unique séparant le milieu (1) du milieu (3).

Il est essentiel de remarquer que la loi (S-D) reste valide même si le dioptre cesse d'être plan, pourvu qu'on puisse définir un plan tangent au point d'incidence à la surface de séparation entre les deux milieux : i_1 et i_2 sont les angles avec la normale à ce plan tangent des rayons incident et réfracté. Ceci explique l'application de la loi (S-D) (ou même auparavant de l'étude des tableaux de Witelo) à l'étude des lentilles.

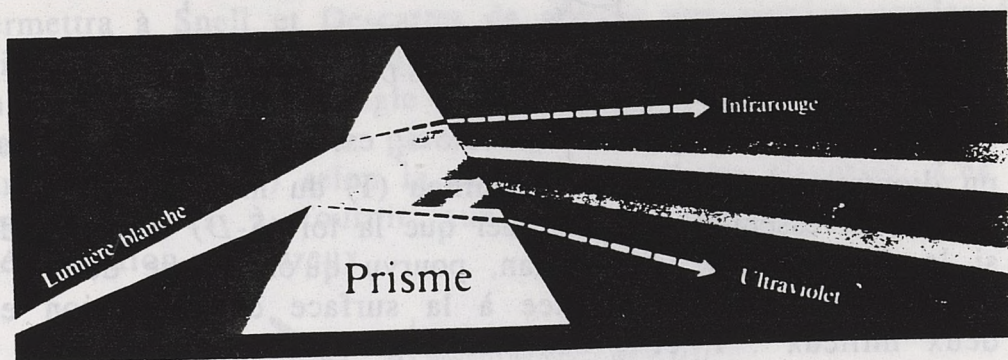
2.3.2 Couleurs de la lumière

Roger Bacon (1214-1294) s'était préoccupé de donner une

explication d'un arc en ciel. Il avait remarqué que la succession invariable des couleurs - rouge à l'extérieur puis orange, jaune, vert, bleu, violet à l'intérieur - se retrouve dans le jet d'une fontaine et plus généralement dans toute pulvérisation de l'eau. Nous tournons le dos au soleil. Le centre commun des cercles de couleur est dans l'axe qui joint le soleil à notre oeil, et le cercle d'une couleur donnée est le lieu des points qui sont vus sous un angle caractéristique; par exemple 42° pour le rouge.

Thierry de Freiberg (mort en 1311) pousse plus loin l'analyse en mettant en évidence le rôle de la goutte sphérique d'eau constitutive de la poussière de gouttelettes. Il remplit d'eau un flacon sphérique, et tournant le dos au soleil vérifie que la couleur de ce flacon ne dépend que de l'inclinaison de la droite joignant l'oeil à son centre par rapport à la direction du soleil et que la correspondance entre couleur et angle est identique à celle décrite par Bacon au sujet de l'arc en ciel.

C'est beaucoup plus tard, en 1672, que Newton expliquera ce phénomène et d'autres en supposant que l'indice de réfraction d'un milieu donné, le verre ou l'eau par exemple dépend de la couleur de la lumière. L'effet de décomposition de la lumière par un prisme était connu avant Newton, et par exemple de Descartes, mais c'est Newton qui a l'idée de vérifier cette idée en effectuant la synthèse de la lumière blanche à partir des composantes monochromatiques d'une lumière décomposée par un premier prisme.



Spectre du visible obtenu par décomposition d'une lumière blanche au travers d'un prisme.

(Source: General Electric Company, Lamp Business Division. Droits réservés.)

Fig. 5 Prisme de Newton

3. Théories corpusculaires et théories ondulatoires de la lumière

Les projectiles d'air subtil. Les lois de la réfraction et de la réflexion et leur application au calcul de l'image d'un objet lumineux à travers un système de dioptrés plans ou sphériques et de miroirs plans ou sphériques convenablement diaphragmés ont suggéré à Descartes une interprétation corpusculaire de la lumière. La lumière se réfléchit contre un miroir comme une balle rebondit sur un mur. La lumière réfracte de la même façon qu'un projectile traversant une toile tendue perd une partie de la composante normale de sa vitesse. Mais une telle explication, compte tenu de l'expérience d'un dioptré de verre en contact avec l'air impliquerait que l'air oppose au passage de la lumière une résistance plus grande que le verre.

3.1 HÉSITATIONS ENTRE THÉORIE ONDULATOIRE ET CORPUSCULAIRE.

Alternativement des théories ondulatoires et corpusculaires de la lumière sont proposées. Huyghens qui est élève de Descartes et qui a accès à des enseignements non publiés par Descartes donne des lois de l'optique géométrique une interprétation ondulatoire. Le motif principal est que des corpuscules qui se croisent devraient se heurter alors que le croisement de deux rayons lumineux ne perturbe pas leur progression.

Puis avec Newton, la théorie est de nouveau corpusculaire.

Thomas Young (1773-1829) pour expliquer les interférences de la lumière puis Augustin Fresnel (1788-1827) pour expliquer la polarisation de la lumière et la diffraction de la lumière, vont rompre avec la doctrine de Newton devenue officielle et promouvoir une théorie ondulatoire de la lumière. Mais Fresnel introduit une nouvelle idée à propos de la propagation de l'onde lumineuse : les vibrations lumineuses sont perpendiculaires à la direction de propagation.

3.1.1 Interférence lumineuse

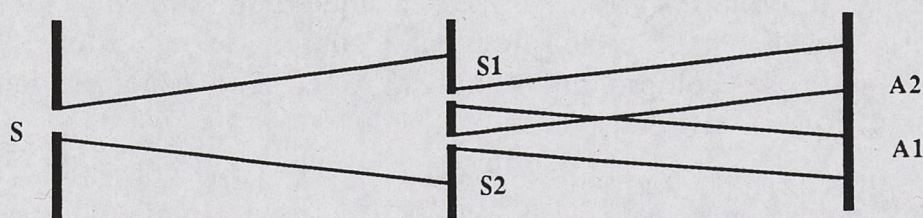


Fig. 6 Interférence de la lumière (expérience des fentes de Young)

Une fente S diffracte la lumière qui est interceptée par un écran percé de deux fentes S_1 et S_2 et équidistantes de S .

La partie commune aux deux faisceaux lumineux issus de S_1 et S_2 est recueillie sur un écran. Si la distance entre S_1 et S_2 est suffisamment petite, on observe sur l'écran une alternance de franges rectilignes parallèles aux fentes alternativement brillantes et sombres.

3.1.2 Diffraction de la lumière

"Une petite ouverture éclairée par un faisceau lumineux se comporte comme une source lumineuse : elle émet de la lumière dans toutes les directions; on peut s'en assurer par l'expérience suivante : perçons un trou d'épingle O dans une feuille de clinquant, et éclairons vivement cette ouverture en concentrant sur elle, grâce à une lentille L , la lumière d'un arc électrique S (voir figure ..1..) D'après les lois de l'Optique Géométrique, on doit s'attendre à n'observer de lumière que dans le cône OAB défini par les bord de la lentille; or, si l'on place l'oeil en un point M même très éloigné de ce cône, le trou O apparaît nettement comme lumineux : il envoie donc de la lumière dans toutes les directions.

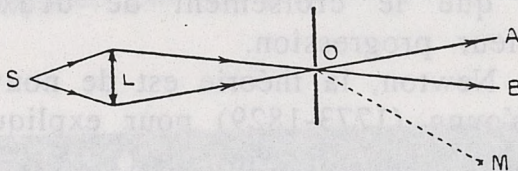


Fig. 7 Diffraction

Cette expérience montre que la propagation de la lumière ne se fait pas suivant la loi simple de la propagation rectiligne de la lumière admise en optique géométrique. Il faut pour l'expliquer faire intervenir sa nature ondulatoire : la lumière se propage de proche en proche dans l'espace, chaque point qu'atteint la vibration lumineuse devenant à son tour une source de vibrations. Il est dès lors facile de comprendre comment elle peut pénétrer dans l'ombre géométrique." (Bruhat, 1965).

3.1.3. Polarisation rectiligne de la lumière

- première expérience :

On fait tourner le miroir M autour de l'axe D. Un rayon parallèle à D est réfléchi par M puis intercepté par l'écran E. La tache lumineuse décrit un cercle. La rayon incident a les mêmes propriétés dans tous les azimuts.

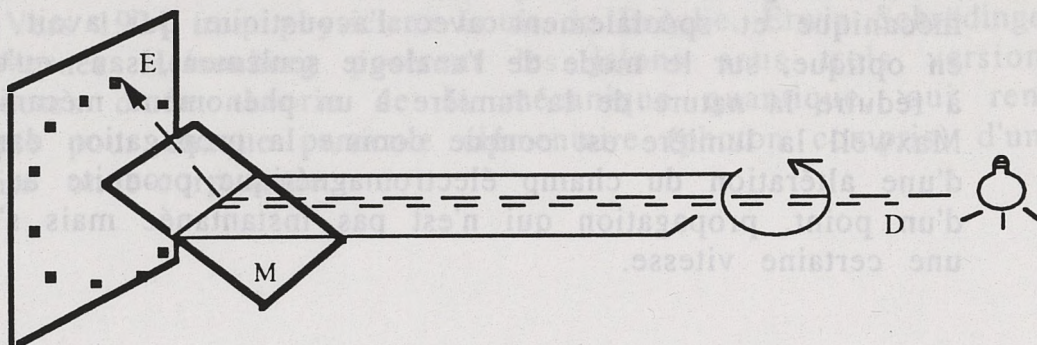


Fig. 8

- deuxième expérience :

La même expérience mais le rayon parallèle à D et réfléchi ensuite par M a été déjà réfléchi par M'. La tache lumineuse ne décrit plus un cercle. La rayon incident n'a plus les mêmes propriétés dans tous les azimuts

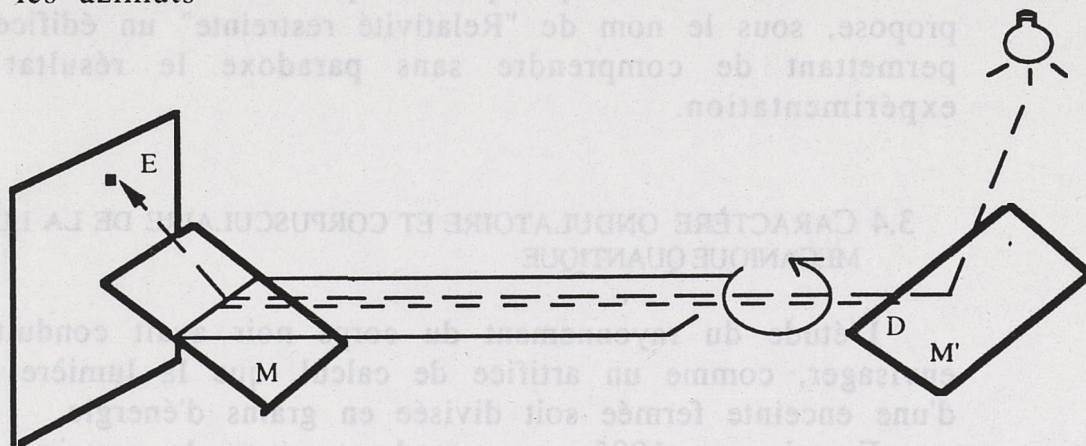


Fig. 9

3.2 LA THÉORIE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DE LA LUMIÈRE

La contribution de Maxwell à l'optique bouleverse la division traditionnelle de la physique en quatre sciences, relativement indépendantes:

Mécanique-Acoustique, Thermodynamique, Optique, Electromagnétisme

A partir des travaux théoriques de Maxwell en électromagnétisme puis des confirmations expérimentales de Hertz, l'optique est réduite en principe à un chapitre de l'électromagnétisme. Jusqu'alors c'est un commerce avec la mécanique et spécialement avec l'acoustique qui avait prédominé en optique; sur le mode de l'analogie seulement, sans qu'on cherche à réduire la nature de la lumière à un phénomène mécanique. Avec Maxwell la lumière est conçue comme la propagation dans l'espace d'une altération du champ électromagnétique produite au voisinage d'un point, propagation qui n'est pas instantanée mais s'effectue à une certaine vitesse.

3.3 LE PROBLÈME DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ET LA NAISSANCE DE LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

La mesure de la vitesse de la lumière devait faire éclater, aux environs de 1880 un scandale théorique. L'expérience de Michelson et Morley suggérait que : La lumière se propage toujours dans le vide avec une certaine vitesse c indépendante de l'état de mouvement de la source lumineuse et de l'observatoire

Il fallait attendre presque un quart de siècle pour qu'Einstein propose, sous le nom de "Relativité restreinte" un édifice théorique permettant de comprendre sans paradoxe le résultat de cette expérimentation.

3.4 CARACTÈRE ONDULATOIRE ET CORPUSCULAIRE DE LA LUMIÈRE : LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

L'étude du rayonnement du corps noir avait conduit Planck à envisager, comme un artifice de calcul, que la lumière prisonnière d'une enceinte fermée soit divisée en grains d'énergie.

Einstein, en 1905, pour rendre compte de certains aspects de l'effet photo-électrique découvert par Hertz, reprit cette idée en la considérant cette fois comme l'expression d'un phénomène réel : il appela "photon" un grain de lumière capable, par exemple

d'arracher un électron au noyau d'un atome. D'autres phénomènes suggéraient la même conclusion.

Ainsi, la théorie se retrouvait devant le paradoxe de deux sortes d'expérience, les unes sollicitant une théorie corpusculaire, les autres une théorie ondulatoire de la lumière.

Mais des expériences encore plus troublantes montrèrent que des corpuscules comme l'électron qui n'avaient jamais posé de problème de ce double point de vue pouvaient dans certains cas présenter un comportement qui évoquait un phénomène ondulatoire; des jets d'électrons pouvaient produire des figures de diffraction.

Vers 1924 trois physiciens Louis de Broglie, Erwin Schrödinger et Werner Heisenberg posèrent les jalons sous trois versions distinctes d'une théorie de la mécanique quantique, qui rend compte pour chaque particule élémentaire (photon compris) d'une dualité onde-corpuscule.

BIBLIOGRAPHIE

- Bruhat G. : 1965, Cours de physique générale. Optique.. Cinquième édition revue et complété par A. Kastler, Ed Masson
- Descartes R. : 1953, Oeuvres et lettres, Bibliothèque de la Pléiade N.R.F.
- Diderot D.: Oeuvres, Bibliothèque de la Pléiade N.R.F.
- Feynman R : 1980, La nature de la physiques, Ed Le Seuil
- Fleury R. et Mathieu J.P.: Lumière, Ed. Eyrolles
- Giles B.: Histoire des techniques. Encyclopédie de la N.R.F.
- Lucrece : 1964, De la nature, traduction Henri Clouard, Ed GF Flammarion
- Maitte B. : 1981, La lumière, Ed du Seuil

3.3 LE PROBLÈME DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ET LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

La mesure de la vitesse de la lumière devant être effectuée dans un milieu matériel, au lieu d'être effectuée dans le vide, a provoqué, vers la fin des années 1800, un scandale théorique. L'expérience de Fizeau et Morley suggérait que : La lumière se propage dans le vide avec une certaine vitesse c indépendante de tout mouvement de la source lumineuse et de l'observateur.

Il fallait attendre presque un quart de siècle pour que soit proposée, sous le nom de "Relativité restreinte" une théorie permettant de comprendre sans paradoxe la mesure de cette expérimentation.

3.4 CARACTÈRE ONDULATOIRE ET CORPUSCULAIRE DE LA LUMIÈRE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

L'étude du rayonnement du corps noir avait conduit Planck à envisager, comme un artifice de calcul, que la lumière primordiale d'une enceinte fermée soit divisée en grains d'énergie.

Einstein, en 1905, pour rendre compte de certains aspects de l'effet photo-électrique découvert par Hertz, reprit cette idée en la considérant cette fois comme l'expression d'un phénomène réel : il appela "photon" un grain de lumière capable, par exemple

Extraits des réponses aux interviews

Le délai de rendu de ce projet, qui était assez court, ne nous a pas permis de développer la partie concernant la conception comme nous l'aurions souhaité; nous présentons ici quelques extraits des interviews réalisées auprès des architectes. Il ne s'agit pas bien sur de montrer l'intégralité de ce qui a pu être dit (les conclusions sont dans la section 3 de la partie principale) mais de faire ressortir quelques morceaux choisis qui nous ont paru particulièrement intéressants et révélateurs.

EXTRAIT 1 :

- On commence toujours par l'étude du programme

JP: Oui c'est répondre à la question posée, digérer le programme en termes d'enjeux quantitatifs, qualitatifs et d'image. Après ça passe par une phase de silence et à un moment une phase de synthèse se fait et on peut passer à l'acte, c'est à dire au croquis. Il y a des croquis de plein de sortes, élévation ou croquis perspectif, un plan suivant l'ampleur et la façon dont on l'a appréhendé. Pour moi le rapport avec l'environnement est une préoccupation instinctive. Quand j'ai digéré les problèmes d'enjeux c'est d'abord par inscrire le projet dans l'environnement, donc des croquis qui vont donner l'échelle...

- L'étude du site se situe où par rapport au temps...

JP: Pour moi ça fait partie du programme, c'est une donnée avec un potentiel qui est là, c'est surtout parce que pour des raisons réglementaires, administratives et le rapport au bâtiment avec l'environnement. Ce sont des éléments fondamentaux qui vont orienter le projet. La différence entre construction et architecture c'est que l'architecture se soucie du vide sur lequel on va construire par rapport à comment on le construit. mais ce qui est le préalable c'est de transformer un lieu, c'est l'enjeu fondamental et la réussite du lieu est liée à cela. Quelque soit la qualité, si c'est en désaccord avec l'environnement cela renverra une image négative de l'espace construit et donc cela va à l'inverse même de l'usage interne.

.....

.....

BIBLIOGRAPHIE

La spécificité de notre métier par rapport à d'autres qui utilisent les mêmes sensibilités humaines, c'est qu'il doit répondre à des problèmes précis du temps et de l'instant. Autant une sculpture peut être comprise dans le temps ou plus tard alors que nous, si on s'est trompée, c'est radicalement dommageable, c'est ce qui correspond à la gestation. ensuite interviennent la sensibilité, la culture qui font que le projet sera tout de même différent d'un projet de quelqu'un d'autre. Ces dimensions là vont du positionnement politique qui se traduit dans l'urbanisme, la façon d'envisager l'art d'habiter jusqu'à la définition personnelle d'un espace ouvert par exemple. Pour soi, c'est de l'ordre de l'indicible, c'est à dire ce que vous ne pouvez pas expliciter et qui fait que vous faites une certaine chose. C'est la dimension du rêve qui se rajoute. Par exemple je traite toujours le rez de chaussée différemment des étages, maintenant je l'explique parce que ce qui se passe à ce niveau est différent de ce qui se passe au dessus (contact avec le sol, les gens, transition avec l'espace public et privé). Maintenant pourquoi le traduire dans la structure du bâtiment... et bien parce que pour traduire ces tensions il faut un espace libre.

.....

.....

• Est-ce que vous pensez que ces critères d'évaluation on peut les mettre en évidence ?

JP: Oui en partie mais on ne peut sortir tous les possibles

.....

Quand on réfléchit urbanisme il est certain qu'il faut rentrer des critères de perception, d'image du projet, les qualités d'usage du bâtiment, ... Vous travaillez avec tout ça en même temps

• Est-ce que vous avez une structuration en critères primaires, secondaires....

JP: C'est personnel, si je travaille tout seul, je n'ai pas besoin de m'expliquer à moi-même. Il est vrai que parfois je fais des synthèses et j'écris les éléments majeurs qu'il faudra constamment valider parce qu'ils vont guider la démarche.

Mais si on est en équipe, à un moment donné je fais une espèce de mise à plat, comment les éléments peuvent conduire à une sorte de prise de position. Il peut même y avoir des croquis préalables qui ne donnent pas l'image du projet mais des éléments clés qui faut toujours respecter. Déjà toute une analyse par croquis, après des choses très claires de l'ordre de l'usage interne (circulation en

lumière naturelle totale par exemple), l'importance de la vue si c'est cela ou tout autre chose c'est très important... Quel espace va être fondamental, quelle signification ?

EXTRAIT 2 :

- Est-ce qu'on peut dégager des phases : esquisse, analyse, lecture du programme.,etc.....

LI : Bien sur je lis le programme mais le programme n'est pas le programme, ce n'est pas un programme d'architecture, souvent les espaces, les lieux les plus importants ne sont pas indiqués. Le programme est une indication des commanditaires de ce qui doit fondamentalement trouver une place dans le projet, il doit y avoir au moins ça. Le vrai programme d'architecture n'est pas une reformulation du programme donné, c'est une reformulation qui vient à la fois de l'analyse du site qui est une première spécificité de chaque projet et d'interrogations profondes sur la demande. En général les programmes ne concernent que la logique administrative ou institutionnelle des choses. Il nous faut prendre du recul. Je pense que le projet n'est pas une réponse au programme, c'est malgré tout une réponse au programme sinon ce n'est pas de l'architecture, mais ce n'est pas une réponse stricte à ce qui est demandé. En fait le but est de réaliser ce qui est implicitement demandé, je crois que le programme n'est pas explicite. La réalité d'un programme est plus complexe que le programme. Le programme est une logique quantitative et de fonctionnement, il faut y répondre mais ce n'est une garantie de rien. Il y a des projets épouvantables qui répondent parfaitement au programme.

.....
.....

LI: L'esquisse peut contenir des éléments de détail, des éléments de configuration, de tracés, d'installation en plans sur un terrain, ça ce sont des choses très importantes.

- Et c'est là qu'on fait le choix de ce qui est important ou non.

LI : Oui exactement on se donne un objet de travail, le programme n'en est pas un. Donc plutôt qu'une esquisse synthétique, c'est de savoir sur quels principes on va travailler, des principes

géométriques, d'installations, typologiques

-donc c'est le choix des principes.....

LI : Oui, lié à des intentions. Ils peuvent être des niveaux différents dans le projet sans que forcément on ait une idée perceptive, on ne sait pas forcément à quoi ça va ressembler. L'esquisse c'est donc la mise en place des principes fondamentaux sur lesquels on va travailler. Il y a déjà des prises de décisions (pas tout au même niveau). On découvre ce que ça fait, ce n'est pas un travail sur l'apparence comme dans l'esquisse au sens traditionnel. Une autre différence avec l'esquisse traditionnelle, c'est que si on fait des choix dans un terrain, des principes de configuration, ce sera nécessairement très précis très vite contrairement à l'esquisse traditionnelle.

.....

EXTRAIT 3 :

.....

JCM : La lecture du programme est une réécriture, on prend des notes, on peut réécrire les surfaces et les relations, on réécrit pour s'approprier ce qui est un pas vers la conception. On en profite pour poser les questions d'éclaircissement. On représente aussi les surfaces sous forme de carrés pour se rendre compte de l'importance des différents éléments du programme sur le plan quantitatif. Cela ne rend pas compte de l'importance des éléments sur d'autres plans c'est purement quantitatif. Parallèlement on essaye de définir les grandes unités fonctionnelles et symboliques (voir les unités à mettre en évidence et ce qu'on ne mettra pas sur le premier plan). Par exemple, nous pensons que les lieux doivent être différents quand les élèves font des choses différentes. Pour ces unités fonctionnelles, on travaille par petits graphiques très simplistes pour essayer de placer les choses les unes par rapport aux autres, et les séparations en grandes unités et les relations entre les grandes unités, où sont les annexes, ce qui sera franchement à part, etc...

- Donc avant ça, dans les schémas fonctionnels et symboliques vous faites une hiérarchie des critères, de quoi vous allez vous occuper ? Il y a quelque chose qui devient la plus importante comme par exemple ici un des critères était de hiérarchiser l'espace.

JCM: Oui je suis d'accord sur le principe mais nous ne choisissons pas un élément, il n'y a pas qu'un élément. On ne va pas assujettir le projet à un élément. Quand je dis que la clairière était importante, ce n'est pas pour cela qu'elle était le seul critère. On a essayé de maintenir plusieurs critères, 2 à 5 éléments importants qu'on souhaite superposer. Il y a hiérarchie mais qui essaye de maintenir plusieurs critères qui paraissent importants; Le site n'est pas plus important que le programme et réciproquement, l'usage des gens qui habitent autour est un peu moins important que l'usage des gens qui habitent dedans mais ils ont quand même leur mot à dire. On essaye d'avoir une avancée riche et large même s'il y a des éléments qu'on peut mettre un peu de côté (ce qui ne signifie pas qu'on va mal les traiter).

- Comment les ingénieurs interviennent-ils?

JCM: De façon assez conventionnelle une fois que les grandes idées architecturales sont placées. D'autre part compte tenu de notre expérience, on a déjà intégré un certain nombre de considérations techniques.

- Est-ce que vous souhaiteriez avoir un bureau où il y aurait des ingénieurs dès le début ? Est-ce qu'il serait utile d'avoir une communication plus forte dès le début?

JCM: Dans l'idéal oui, avec des ingénieurs qui soient hyper-généralistes.

