

Université de Montréal

Une nouvelle approche d'aide à la conception par ordinateur en architecture basée sur la
modélisation d'opérateurs sémantiques et la création de maquettes procédurales

par
Giovanni De Paoli
Faculté de l'aménagement

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Philosophiæ Doctor (ph. D.)
en **aménagement**

septembre, 1999

© Giovanni De Paoli, 1999



Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

Une nouvelle approche d'aide à la conception par ordinateur en architecture basée sur la
modélisation d'opérateurs sémantiques et la création de maquettes procédurales

présentée par :

Giovanni De Paoli

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

[Redacted]

président du jury

Jacques Lachapelle

[Redacted]

directeur de recherche

Claude Parise

[Redacted]

membre du jury

Philippe Lalande

[Redacted]

examineur externe

Michel Léglise

[Redacted]

représentant du doyen

François Lustman

Thèse acceptée le : 1^{er} décembre 1999

SOMMAIRE

L'histoire de l'architecture et de son enseignement illustrent bien comment la représentation de l'image et le dessin ont évolué au fil du temps. Aujourd'hui l'ordinateur est de plus en plus utilisé dans les ateliers des professionnels et des étudiants en architecture, mais son utilisation reste confinée à des fonctions techniques (*tekhnê*), et ce que l'on appelle couramment CAO (conception assistée par ordinateur), n'est souvent, en architecture, que du DAO (dessin assisté par ordinateur).

Cette recherche porte sur la conception en architecture et tout particulièrement pendant sa toute première phase. L'objectif est de proposer un modèle de description de l'idée architecturale répondant aux besoins des architectes. C'est alors seulement qu'ils pourront s'approprier l'ordinateur comme outil d'aide à la conception en dépassant les blocages qui en limitent aujourd'hui la pleine exploitation.

C'est par le désir de résoudre cette impasse que j'ai commencé à étudier et cherché à comprendre les méthodes de travail de l'architecte à travers l'histoire de la représentation graphique et les pratiques actuelles. Ce qui m'a amené à proposer une voie d'exploration qui étudie la «projétation» par les propriétés de l'objet et à proposer une méthode d'aide à la conception par ordinateur qui ferait appel à des maquettes procédurales. Ces maquettes procédurales sont constituées à partir d'opérateurs géométriques et d'opérateurs qui définissent les propriétés, les qualités et les performances du bâtiment, opérateurs que j'ai appelés sémantiques.

Ma question de départ : comment l'architecte peut-il tirer parti de la CAO considérant qu'il a développé un langage et des méthodes de travail adaptés à la représentation bidimensionnelle? Par une réflexion sur les méthodes de travail, les outils, les médias utilisés par l'architecte pour représenter les diverses phases du projet d'architecture, j'ai été amené à construire l'hypothèse de travail qui a guidé toute ma recherche : «la pleine exploitation de la relation concepteur-ordinateur va de pair avec un changement radical du langage pour la figuration».

Cette recherche se situe dans un paradigme qui amène à représenter le bâtiment par des fonctions paramétrables qui, encapsulées algorithmiquement, permettent de créer des maquettes procédurales d'aide à la conception. Cette approche ouvre une

voie qui intègre le *logos* à l'équation métaphorique de la représentation où actuellement le dessin prend la place de l'écrit en estompant la pensée.

L'exemple d'une maquette procédurale du théâtre romain selon Vitruve illustre comment, par un modèle générique, nous pouvons produire un modèle volumique avec toutes les caractéristiques qui appartiennent à la même famille d'objets. Un tel modèle permet non seulement d'illustrer le résultat d'un processus, ou d'établir la parenté des bâtiments par leur procédé de construction et de vérifier la validité d'une règle qui caractérise un ensemble d'objets, mais il permet aussi d'intégrer, par un langage fonctionnel, des opérateurs sémantiques jusqu'à présent exclus pendant la première phase de la conception. Ce mécanisme de description est extrêmement puissant, il permet d'établir les relations entre les fonctions, les propriétés du bâtiment et l'objectif du projet architectural.

L'apport scientifique de cette recherche est de valider l'hypothèse voulant que nous pouvons intervenir, grâce aux outils informatiques, sur des opérateurs qui permettent à l'architecte de se réapproprier une conception complexe du bâtiment et d'ouvrir de nouvelles pistes d'investigation sur l'intégration des systèmes géométriques et des systèmes à base de connaissances au sein d'une représentation unifiée. L'approche déclarative pour la création de scènes tridimensionnelles s'inscrit dans cette perspective.

Il s'agit maintenant d'explorer la possibilité de travailler sur une «morphologie commune» à tous les acteurs tout au long du processus de conception par une réécriture des fonctions ou par un transfert des fonctions utilisées pour la figuration ou encore, par un dialecte (langage) fonctionnel qui permette un lien dialectique entre tous les types d'opérateurs et les actions des protagonistes du processus de conception en architecture.

Mots Clés : architecture, informatique, conception, figuration, modélisation, CAO, opérateur géométrique, opérateur sémantique, maquette procédurale.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES.....	viii
REMERCIEMENTS	xi
AVANT-PROPOS.....	xiv
INTRODUCTION.....	1
• La question de départ et l'hypothèse de travail	2
• La stratégie de recherche	5
PARTIE I : ARCHITECTURE ET CONCEPTION.....	9
Chapitre 1 Le caractère distinctif de l'architecture	12
1.1 Les dimensions	13
1.2 L'espace.....	16
1.3 Les formes.....	18
1.4 L'échelle.....	21
1.5 La compréhension des paramètres pour la modélisation du bâtiment.....	23
Chapitre 2 La conception à l'ombre de l'architecture	28
2.1 Les «représentations» du processus de conception	32
2.2 La définition du problème pendant le processus de conception	34
2.3 Le rôle des connaissances	41
Chapitre 3 Le processus de conception et le rôle de l'architecte.....	46
3.1 Le processus de conception et sa traduction matérielle	47
3.2 L'architecte et la dualité entre poétique et technique	56
3.2.1 Le rôle de l'architecte dans l'histoire.....	58
3.2.2 La naissance des corporations professionnelles et la normalisation du projet.....	65
3.3 La représentation ou la perception.....	70
Chapitre 4 Le processus de production du projet d'architecture	74
4.1 Les moyens de représentation architecturale.....	76

4.2	Les systèmes de représentation	78
4.2.1	Approche technique de la représentation.....	79
4.2.2	Gestion de la représentation.....	81
4.2.3	Le statut de l'image et la forme à travers l'image	84
4.2.4	Le projet d'architecture	86
4.3	Le pourquoi du choix du modèle informatif.....	92
Chapitre 5	La conception par ordinateur en architecture	95
5.1	Nouvelles approches de la CAO pour tirer parti de l'informatique	96
5.1.1	Les problèmes à résoudre pour construire un langage de figuration commun.....	101
5.1.2	Les approches épistémologiques à la conception assistée par ordinateur	103
Conclusion	.....	105
PARTIE II : LA COMMUNICATION ET L'OUTIL INFORMATIQUE		112
Chapitre 6	Communication visuelle et écran d'ordinateur	117
6.1	La perception de l'image	119
6.2	La représentation spatiale et l'écran.....	122
6.2.1	Le concepteur-photographe.....	123
6.2.2	Le concepteur-réalisateur de scènes	127
6.2.3	Le concepteur-metteur en scène.....	132
6.3	La théorie sémiotique du visible	138
6.3.1	Voir et penser sont-ils vraiment distincts?	143
6.4	Les icônes, symboles de communication en CAO.....	146
6.4.1	Les outils pour inventer.....	150
6.5	La représentation graphique.....	154
6.5.1	Le traitement de l'information par le dessin	155
Chapitre 7	La programmation des logiciels en CAO	164
7.1	Les outils de dessin et de conception assistés par ordinateur	165
7.2	La modélisation	168
7.2.1	Les applications 2D : le modèle bidimensionnel.....	170
7.2.2	Les applications 3D : le modèle tridimensionnel	173
Chapitre 8	La recherche sur les méthodes de travail des architectes.....	179
8.1	Description du pré-test	182
8.1.1	Description de l'expérience et méthodologie.....	184
8.1.2	Analyse des résultats	188
8.2	L'étude de cas	189
8.2.1	Définition des variables.....	190
8.2.2	Description de l'étude de cas et méthodologie	192
8.2.3	Analyse des résultats	195
Conclusion	.....	198

PARTIE III : DE LA TAVOLETTA AU SKETCH PAD.....	201
Chapitre 9 Les langages de modélisation informatique	209
9.1 Sous les images, les mots	210
9.2 La «conception» de l'outil informatique.....	212
9.3 Un modèle pour la définition des opérateurs.....	216
9.4 Pour une encyclopédie discursive de maquettes procédurales	221
9.4.1 Quelques exemples de maquettes procédurales	225
9.5 Les représentations spatiales par les modèles informatiques.....	243
9.5.1 Un exemple de langage du «non visible»	251
9.5.2 Un exemple de langage du «visible»	253
9.5.3 Un exemple de langage «causal-probabiliste»	262
Chapitre 10 L'expérimentation sur les opérateurs sémantiques.....	276
10.1 Un modèle de formulation et de résolution de problèmes	279
10.2 Mise en situation.....	281
10.3 La création de maquettes procédurales.....	288
10.4 Description de l'expérimentation : les tests	290
10.4.1 Mise à l'épreuve de la modélisation des opérateurs (première expérimentation)	301
10.4.2 Les résultats de la première expérimentation	304
10.4.3 Mise à l'épreuve de la modélisation des opérateurs (deuxième expérimentation).....	306
10.4.4 Les résultats de la deuxième expérimentation.....	311
Conclusion	312
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	317
• Discussion des résultats et pistes de développement.....	320
BIBLIOGRAPHIE	332
ANNEXES.....	xviii
POSTFACE	xix

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1.</i> «Il faut penser différemment.» (B. Werber, 1991).....	3
<i>Figure 2.</i> « Mais sur toutes les merveilleuses inventions, quelle puissante pensée celle de celui qui imagina la façon de communiquer ses intuitions les plus cachées à toutes les autres personnes, même si lointaines par le lieu et le temps?» (G. Galilei, Dialogue sur les deux systèmes du monde <i>Tolemaico et Copernicano</i>)	8
<i>Figure 3.</i> Diagramme de l'homme de Vitruve, Vincenzo Scamozzi, dans <i>L'idea della architettura universale</i> (H.-W. Kruft, 1995).....	10
<i>Figure 4.</i> Les plans en architecture, document promotionnel des condominiums <i>Le Berri-Bonsecours</i> (Dupuis et Le Tourneau, architectes, Montréal, Canada)	15
<i>Figure 5.</i> L'ensemble sensible.....	16
<i>Figure 6.</i> Photo de l'atelier de quatrième année à l'École d'architecture de Montréal (1999).....	18
<i>Figure 7.</i> La forme ou la fonction : la bouteille ou le <i>flasco</i>	19
<i>Figure 8.</i> La maison Laurin (De Paoli et Pellissier, architectes, Mirabel, Canada).....	20
<i>Figure 9.</i> La maison Richer (De Paoli et Pellissier, architectes, La Minerve, Canada)	21
<i>Figure 10.</i> Exemple d'étude ergonomique, <i>Le design d'intérieur</i> (D.K., Ching, 1995).....	23
<i>Figure 11.</i> La quatrième dimension : espace et temps , savoir et savoir-faire (M. Bogdan, 1999).....	25
<i>Figure 12.</i> La conception : description du résultat et processus de son obtention (La Trinité par Masaccio (1425) Santa Maria Novella Florence, Italie).....	28
<i>Figure 13.</i> Exemple du schéma de C. Alexander selon V. Rivero (1977, p. iii.3).....	35
<i>Figure 14.</i> Programmation des pièces d'une maison	36
<i>Figure 15.</i> Esquisses de la maison de l'opéra de Toronto (M. Safdie, architecte, Somerville, É.-U.)	50
<i>Figure 16.</i> Les projections orthogonales : exemples de redondance (à gauche) d'ambiguïté (au centre), et d'incohérence (à droite) (C. Parisel, 1990)	53
<i>Figure 17.</i> L'embryon en architecture (<i>Transmedia junction : l'architecture alternative aux États-Unis</i> , G. De Paoli et al., 1975)	55
<i>Figure 18.</i> La pratique du trait à preuves de Messieurs Desargues, lyonnais, pour la coupe des pierres en l'architecture, publié par Abraham Bosse, Paris, 1663 (Simonnet, 1987)	60
<i>Figure 19.</i> Correction du point de vue perspectif, T. Gallaccini, Trattato sopra gli errori degli architetti, 1625 (Kruft, 1995)	63
<i>Figure 20.</i> Comportement fictif de la matière, figure représentant un linteau et son appareillage (S. Ferro, 1987).....	64
<i>Figure 21.</i> Le <i>building team</i> médiéval.....	65
<i>Figure 22.</i> Le <i>building team</i> en 1700 (après la Renaissance)	66
<i>Figure 23.</i> Le <i>building team</i> au début 1800	66
<i>Figure 24.</i> Le <i>building team</i> en 1900.....	66
<i>Figure 25.</i> Les documents et les phases du projet architectural	69
<i>Figure 26.</i> Chaque observateur/acteur vise un objectif avec un regard critique et différent.....	71
<i>Figure 27.</i> Plan, élévation et trois vues en perspective d'une maison, gravure (T. Malton, 1776)	75
<i>Figure 28.</i> Carnet de croquis (A. Marty, architecte, Villeneuve-de-la-Raho, France, 1998).....	75
<i>Figure 29.</i> La hiérarchie contractuelle dans le processus de construction (R. Pietroforte, 1992).....	81
<i>Figure 30.</i> Processus du projet d'architecture (A. Forgia, 1988).....	83
<i>Figure 31.</i> Modèle du processus de design d'après Markus (1972).....	87
<i>Figure 32.</i> La phase de conception	88
<i>Figure 33.</i> Les phases d'exécution et de réalisation.....	89
<i>Figure 34.</i> Cinq principaux types de communication du processus de conception architecturale (Tidafi, 1996).....	91
<i>Figure 35.</i> Modèle de référence en CAO (W. Mitchell, 1989).....	99
<i>Figure 36.</i> La décomposition du village indien de C. Alexander (hiérarchie arborescente).....	103
<i>Figure 37.</i> L'architecte et les acteurs du projet.....	108

<i>Figure 38.</i> Modèle vertical a) et horizontal b) (Mitchell 1977).....	109
<i>Figure 39.</i> <i>The state of the Art in Design Methods</i> (Jones, 1970).....	111
<i>Figure 40.</i> Les variables indépendantes et la variable dépendante	116
<i>Figure 41.</i> La représentation spatiale fait référence aux images que se fait un individu du monde et des objets qu'il perçoit à l'aide d'un ordinateur et d'un écran	122
<i>Figure 42.</i> Le style du concepteur : esquisses de l'observatoire Einstein à Posdam par E. Mendelshon, 1920 (V. Magnago Lampugnani, 1982)	126
<i>Figure 43.</i> Schéma du développement de la représentation spatiale de Piaget (Mongeau, 1989).....	129
<i>Figure 44.</i> Le cube de Necker.....	140
<i>Figure 45.</i> «l'omino di Cimatti».....	141
<i>Figure 46.</i> La Conversion de Saint-Paul du Caravage (1600).....	143
<i>Figure 47.</i> La boîte noire.....	144
<i>Figure 48.</i> Exemple d'idéogramme chinois : le mot maison, représentant le contenu sémantique en même temps que la réalité physique.....	148
<i>Figure 49.</i> Formulation d'un processus qui va du modèle perceptif au sémantique (U. Eco, 1992).....	151
<i>Figure 50.</i> Procédé d'invention modéré ou radical (U. Eco, 1992).....	152
<i>Figure 51.</i> Le Panthéon, élévation et coupe en écorché, anonyme 1553 (E. Blau et al., 1989).....	157
<i>Figure 52.</i> «Habitations suspendues» de Bodo Rasch (L'architecture et son image, CCA, 1989, p. 187)...	158
<i>Figure 53.</i> Exemple de simulation iconique, esquisse : les espaces d'Abraxas.....	159
<i>Figure 54.</i> La maison Dionne sur la rue Berri, exemple de dessin d'exécution.....	160
<i>Figure 55.</i> Exemple de tableau des portes et devis descriptif (De Paoli et Pellissier, 1992).....	163
<i>Figure 56.</i> Interprétation de la typologie proposée par McKechnie (1977).....	167
<i>Figure 57.</i> Schéma de modélisation selon C. Pair et M.C. Gaudel (Quintrand, 1985)	168
<i>Figure 58.</i> La représentation par coordonnées (De Paoli et Pellissier, 1992).....	170
<i>Figure 59.</i> Copie d'un objet (De Paoli et Pellissier, 1992).....	171
<i>Figure 60.</i> L'objet virtuel (De Paoli et Pellissier, 1992)	172
<i>Figure 61.</i> L'objet et son classement par couches (De Paoli et Pellissier, 1992).....	172
<i>Figure 62.</i> Validation du processus de conception	173
<i>Figure 63.</i> Représentation par les frontières d'un cube (M. Dürr, 1989).....	174
<i>Figure 64.</i> Exemple d'objet 3D et de sa représentation CSG (Cambay, 1992).....	175
<i>Figure 65.</i> Exemple d'objet 3D et de sa représentation voxel et octree (V. Popov, 1998).....	178
<i>Figure 66.</i> Les méthodes de travail des architectes en CAO : la mesure ou la compréhension du modèle.....	179
<i>Figure 67.</i> Schéma du modèle systémique d'évaluation (A. Ouellet, 1981, p. 44).....	182
<i>Figure 68.</i> le modèle à reproduire.....	185
<i>Figure 69.</i> Observation de la mise en place d'une méthode de travail.....	186
<i>Figure 70.</i> Observation de l'exécution de la tâche (temps d'apprentissage et de réalisation).....	186
<i>Figure 71.</i> Modèles de traitement du problème en conception architecturale.....	196
<i>Figure 72.</i> Sous les images les mots (École d'architecture du Languedoc-Roussillon, 1997).....	210
<i>Figure 73.</i> Le modèle pour la définition des opérateurs	219
<i>Figure 74.</i> Vérification des conditions qui influencent les actions et les opérateurs.....	219
<i>Figure 75.</i> Formulation des problèmes par la figuration	220
<i>Figure 76.</i> Les modèles à la fois résultats et moyens dans le processus de conception des systèmes d'information (F. Adreit et Vidal, 1998).....	222
<i>Figure 77.</i> Processus de construction de modèles.....	226
<i>Figure 78.</i> Les polyèdres courants : le tétraèdre, l'octaèdre et l'icosaèdre.....	229
<i>Figure 79.</i> Subdivisions du pavillon des États-Unis à l'Expo67. Subdivision en 16 (2-2-2-2) et construction d'une double nappe hexagonale sur une sphère de rayon plus petit	231
<i>Figure 80.</i> Effet de la hauteur du centre de projection sur l'horizontalité de la base.....	232
<i>Figure 81.</i> Illustration du principe de construction, processus de modélisation (C. Parisel, 1995).....	239
<i>Figure 82.</i> Simulation interactive des limites constructives (M. Bogdan, 1996)	240
<i>Figure 83.</i> Exemples de programmes de modélisation de la voûte, écrits en langage fonctionnel.....	241
<i>Figure 84.</i> Exemples de programmes de modélisation de la voûte, écrits en langage fonctionnel.....	242
<i>Figure 85.</i> Approche conventionnelle et arithmétique (J.-F. Rotgé, 1997).....	246

<i>Figure 86.</i> Carnet d'esquisses sur les Formes Pascaliennes (A. Marty, 1999).....	255
<i>Figure 87.</i> Carnet d'esquisses sur les Formes Pascaliennes (A. Marty, 1999).....	256
<i>Figure 88.</i> Identification des actions modélisables (M. Suwa, 1998)	258
<i>Figure 89.</i> Identification des actions modélisables (M. Suwa, 1998)	259
<i>Figure 90.</i> Image de la scène finale "train" obtenue par une séquence d'activités exécutées selon un scénario de conception (V. Popov, 1998)	270
<i>Figure 91.</i> Modélisation du processus de construction de la voûte byzantine (M. Bogdan, 1997)	291
<i>Figure 92.</i> Exemple d'étude par primitives géométriques.....	293
<i>Figure 93.</i> Exemple d'une partie du langage impératif et linéaire (DXF) pour la description du modèle du théâtre présenté dans le tableau B (opérateurs de type géométrique).....	294
<i>Figure 94.</i> Exemple d'étude par primitives géométriques et opérateurs.....	295
<i>Figure 95.</i> Exemple d'étude par primitives géométriques et opérateurs.....	296
<i>Figure 96.</i> Exemple d'étude par primitives géométriques et opérateurs.....	297
<i>Figure 97.</i> Exemple d'étude par primitives géométriques et opérateurs.....	298
<i>Figure 98.</i> Modélisation du processus de la manière de bâtir le théâtre	300
<i>Figure 99.</i> Exemple de définition des paramètres.....	302
<i>Figure 100.</i> Différentes figurations d'une maquette procédurale (Modélisation des opérateurs et des actions)	303
<i>Figure 101.</i> Les opérateurs en conception.....	305
<i>Figure 102.</i> Transformation algorithmique de la propriété sémantique acoustique (De Paoli et Bogdan, CAADFutures99, 1999)	307
<i>Figure 103.</i> Station spatiale (Bibliothèque numérique de la NASA, É.-U.)	308
<i>Figure 104.</i> Exemples d'instances du modèle procédural (figuratif et fonctionnel) obtenues par l'interaction avec les paramètres géométriques (rappel de la première expérience).....	309
<i>Figure 105.</i> Exemples d'instances du modèle procédural (figuratif et fonctionnel) obtenues par l'interaction entre les opérateurs sémantiques (deuxième expérience).....	310
<i>Figure 106.</i> Raphaël Sanzio, détail de la fresque L'école d'Athènes (1509-1514), Musée du Vatican, Rome (Photo G. De Paoli, 1998).....	316
<i>Figure 107.</i> Le stade de France de la main à la machine, entrevue de C. Dupuis avec A. Zubieta 1998	322

REMERCIEMENTS

C'était au milieu des années quatre-vingt-dix motivé, par un désir d'approfondir mes recherches sur la conception et le dessin assistés par ordinateur, que j'ai rencontré d'anciens collègues et amis de l'Université de Montréal et McGill pour avoir leur avis sur mon inscription au programme de doctorat de la Faculté de l'aménagement : Colin Davidson, Alain Findeli et Tom Lawand. Ils m'ont donné des conseils, ont formulé des mises en garde et ont recommandé ma candidature.

Puis j'ai rencontré le «Groupe en CAO» : Claude Parisel, Manon Guité, Temy Tidafi, Jean-François Rotgé, Laurent Daniel... «Si tu veux faire de la modélisation, c'est ici, le virtuel par contre...» C'est sur ces paroles que Claude a accepté d'être mon directeur de thèse. Un collègue au départ, un ami depuis. J'ai toujours su apprécier cette attitude de liberté face à mes recherches : seulement quelques mots, de temps à autre, par exemple «les opérateurs...», puis y réfléchir et un peu comme sur le chantier savoir clouer à la bonne place tout en laissant une ouverture à d'autres solutions.

Que de discussions au local 168. Et que de liens qui se sont tissés avec les étudiants en maîtrise et en en doctorat, Alice, Wang Elvire... qui de temps à autre passaient par là pour apprendre un nouveau langage de communication : le langage fonctionnel. Que de sourires après avoir «vu» sa première image : des heures pour quelques pixels... Enfin, Marius Bogdan, qui a su patiemment me suivre dans mes méandres philosophiques et dont la collaboration pour la programmation et la modélisation a été si précieuse.

Puis, mon passage «sabbatique» en France à l'École d'architecture de Montpellier, Alain Marty et les courbes de Bézier et les formes pascaliennes. Lozka Popova et la modélisation déclarative : le virtuel devenu réel !...

Par la suite, les locaux ont changé, le Groupe du GRCAO a grandi, c'est au 2069 que vous pouvez rencontrer Denis Gamache, Ivanka Iordanova et parler de langage fonctionnel, de conception architecturale et de la vie ; pendant que Temy ou Manon passent de temps à autre, laissant un sourire et quelques notes de travail.

Et que dire de Robert Dion et, tout particulièrement, de Danielle Dionne, mon comité de lecture et de contrôle du bon usage de la langue et de la logique. Sans oublier les nombreux collègues qui en lisant et discutant mes articles ou en se prêtant à des entrevues et des échanges sur la conception en architecture et l'informatique, m'ont aidé à rédiger cette thèse.

Et enfin Vitruve,

Merci

Afin de garder la trace de son bien-aimé,
Une jeune fille aurait cerné d'un trait
L'ombre de son visage projetée sur une paroi.
C'est par ce compromis entre l'amour
Et la géométrie que la mythologie grecque
Fixe la naissance de l'image. (P. Comar)

AVANT-PROPOS

L'épistémologie, la science des sciences. Dans un débat d'idées il est de bon ton de pouvoir affirmer que l'un est positiviste, tandis que l'autre est constructiviste. Encore mieux, lors d'un repas amical avec nos collègues, pendant que nous dégustons notre faisán à la crème et champignons sauvages, nous sommes fiers de donner un petit cours à nos convives, sur les *Basic Beliefs of alternative Inquiry Paradigms* selon G. Guba (1994), ou tout simplement d'expliquer les contrastes entre les paradigmes, d'une part des positivistes et post-positivistes qui ont une approche épistémologique réaliste, objectiviste, et d'autre part, des tenants de la *critical theory* et des constructivistes qui partagent une approche subjectiviste.

Nous sommes capables de dire, épistémologiquement parlant, que chez les positivistes et post-positivistes il y a une séparation entre ontologie et épistémologie. Que pour le positiviste, le chercheur et l'objet de l'investigation sont deux entités indépendantes alors que pour le post-positiviste, cette attitude tend à être abandonnée et le chercheur devient un «gardien» extérieur. Que les tenants de la *critical theory* parlent de chercheur-recherche interreliés et finalement que les constructivistes affirment que le chercheur et l'objet de la recherche sont interactivement liés, il n'y a plus de distinction entre ontologie et épistémologie. (Guba, 1994)

La question que je me suis posée tout au long de ce débat a été de savoir s'il était possible, de situer mon approche épistémologique et d'évaluer ma contribution à l'avancement des connaissances. Ma première réponse a été d'estimer que quand nous ne pouvons pas nous appuyer sur des argumentations précises, il vaut mieux se taire, déguster notre faisán, petit morceau par petit morceau, et tout simplement, un peu comme Descartes le suggérait dans *Le discours de la méthode*, de faire appel au bon sens :

«Le bon sens est la chose du monde la mieux partagée: car chacun pense en être si bien pourvu, que ceux mêmes qui sont les plus difficiles à contenter, en toute autre chose, n'ont point coutume d'en désirer plus qu'ils en ont. En quoi il n'est pas vraisemblable que tous se trompent ; mais plutôt cela témoigne que la puissance de bien juger, et distinguer le vrai d'avec le faux, qui est proprement ce qu'on nomme le bon sens ou la raison, reste naturellement égale en tous les hommes ; et ainsi que la diversité de nos opinions ne vient pas de ce que les uns sont plus raisonnables que les autres,

mais seulement de ce que nous conduisons nos pensées, par diverses voies, et ne considérons pas les mêmes choses.» (1966, p. 33)

Mais il est aussi clair, comme le dit si bien J. Gaarder dans *le Monde de Sophie*, que : «Il est également plus facile de poser des questions philosophiques que d'y répondre» (1995, p. 28) et que si nous acceptons de contribuer au progrès scientifique, nous devons nous rappeler que «nous n'apprenons que par essais et par erreurs et nous avons besoin de la critique d'autrui pour nous rendre compte de nos erreurs». C'est un peu ce que j'attends des lecteurs de ce travail, convaincu que l'erreur a un rôle important dans le processus d'argumentation et d'acquisition des connaissances : «Nos erreurs nous instruisent, telle est la base de toute épistémologie et méthodologie». (Beaudoin, 1989, pp. 55-187)

Je suis donc confiant que le lecteur verra que j'ai pu répondre aux questions soulevées ; parfois d'une façon différente, certes, mais avec le même but : contribuer à l'avancement des connaissances, non seulement au plan de l'évolution de la pensée scientifique, mais plus encore sur le plan de la compréhension de l'être humain et de sa place dans le monde.

Dans cette optique donc, conscient que l'expérience est un des fondements de la science et que, comme le disait Goëthe «L'expérience corrige l'homme chaque jour, l'expérience est le privilège de la raison», j'ai présenté ma problématique, ma pensée, ma méthodologie de travail et mes travaux de recherche, en espérant susciter un débat ainsi qu'une critique.

On constatera que les choix épistémologiques présents dans la première partie s'entremêlent parfois avec ceux explicités dans la deuxième partie de cette thèse, ou encore que les recherches présentées n'ont pas toujours un lien séquentiel. Cette présentation est due au sujet traité l'architecture, et à sa complexité. Afin de répondre aux exigences d'une thèse de doctorat, il a fallu pour chacune des recherches, identifier la question et la mettre en relation avec l'approche épistémologique propre au type de recherche. Enfin, il a fallu aussi dégager en conclusion, de nouvelles pistes de recherche en portant une attention particulière à l'aménagement.

Depuis les plus anciens philosophes grecs, et Démocrite (460-370 av. J.-C.), à qui nous devons le concept d'atome, en est un exemple, nous avons cherché à décomposer

la matière et la pensée. Cette attitude qui consiste à décomposer, à réduire, puis par la suite à classer, nous a amenés, en architecture et en aménagement, à nous confronter à un des plus grands paradigmes épistémologiques : la classification. Dans la présentation de ce travail, j'ai cherché à ne pas utiliser cette méthode et à voir l'architecture comme un ensemble complexe où l'informatique est mise à contribution comme fédératrice des sciences de la conception.

«La science de l'homme se divise en une philosophie, une philologie et une science empirico-historique», disait Vico au début du XVIII^e siècle, en ouvrant la porte à la sociologie et peut-être au même type de problématique que cette thèse soulève. L'informatique pourra-t-elle proposer par son interdisciplinarité un processus de modélisation du projet d'architecture qui amenuise la séparation des disciplines? Et si oui, pourquoi?

Je définis l'architecture comme la science de l'«espace» où l'homme est parfois le centre du monde, parfois celui qui s'approprie le monde, parfois celui qui est dans le monde, et je vais la considérer comme une sorte de méta-discipline : «la science de la conception», disait H.A. Simon (1969), une science «sociale» dont l'objet est nécessairement un projet avec son épistémé. (Piaget, 1970)

Cette thèse veut montrer qu'on peut proposer une modification de la différence et de la hiérarchie entre les sciences, comme le souligne si bien Le Moigne : «Il est vrai que depuis plus d'un siècle, la question du statut de la connaissance s'est souvent présentée comme une noble dispute dont les tenants extrêmes étaient le matérialisme et l'idéalisme. Question qui fut apparemment réglée par un arbitrage séparant connaissance scientifique (présumée objective) et connaissance philosophique (présumée subjective)». (1995, p. 113)

La thèse se distingue par sa structure qui s'apparente parfois à des articles et par sa finalité qui n'est pas le développement d'une théorie, mais la proposition d'application d'un modèle. Il s'agit d'une argumentation sur la conception en architecture, sur l'outil de travail qui est le dessin en y ajoutant mon expérience. Je présente mon approche, le choix du modèle, sa modélisation et l'apport scientifique de cette démarche. Cela tout en essayant d'éliminer une attitude commune aux facultés professionnelles : un désir de s'identifier aux sciences naturelles ou *hard* pour lesquelles le progrès vient du scientisme, par opposition aux sciences humaines qui prospèrent par l'herméneutique.

(Riedl, 1985, p. 103) En effet, «Soucieuses de se construire et d'être reconnues comme sciences... les sciences sociales ont connu une période de modélisation aux sciences physiques et naturelles, érigeant en dogme l'expérimentation, l'objectivité et la mesure». (Martin, 1987) Ou, comme disait Galilée, c'est le langage mathématique qui prime, en nous expliquant que le langage de la philosophie est fait de figures géométriques, sans lesquelles il est impossible de comprendre. (Cini, 1987)

INTRODUCTION

Charrette : travail intensif effectué pour transmettre à temps un travail (notamment dans les agences d'architecture, de publicité, les métiers de communication). Ce mot, dont nous pouvons lire dans presque tous les dictionnaires la définition ci-présentée, est un des premiers que l'étudiant en architecture apprend et qui le poursuivra pendant toute sa profession : l'image, à l'école des Beaux-Arts, du commis qui avec sa charrette passait ramasser les plans pour la remise des travaux.

Oui, il fallait une charrette pour ramasser des plans, dessinés sur du parchemin ou sur du papier ciré, et encore aujourd'hui, il nous faut des dizaines de cartables de toutes les dimensions pour nos plans, tracés sur papier par des imprimantes à jet d'encre ou laser, placés parmi ces immenses feuilles sur lesquelles les architectes ont dessiné et réalisé le parti architectural. Pourquoi toutes ces feuilles? C'est de cette façon que je peux résumer ma question de départ, car hanté après plus de vingt ans de pratique professionnelle, d'enseignement et de recherche dans le domaine de l'architecture, je n'avais pas encore trouvé une réponse.

Dans les années quatre-vingts, en me passionnant pour l'informatique et en migrant du domaine de l'énergie solaire qui me demandait de modéliser le bâtiment et les données climatiques, je trouvais dans l'ordinateur l'outil qui offrait un écran ouvert sur et vers de nouveaux espaces et je rêvais que bientôt la description simpliste des objets que l'on connaît actuellement en architecture serait remplacée par une chaîne virtuelle complète allant de la conception à la fabrication : l'écran prendra forme sur un chantier où deux lasers croisés dessineront dans l'air l'image du bâtiment à construire : le virtuel devenu réel. (De Paoli et Pellissier, 1992)

De là une foule de questions se sont enchaînées : l'ordinateur sera-t-il l'outil qui nous fera oublier l'image du commis et de la charrette pour la transformer en commis virtuel? Les bits électroniques pourront-ils remplacer le papier? La suppression du support papier entraînera-t-elle la perte des points de repères traditionnels? Le concepteur sera-t-il capable de modéliser, de fixer de nouveaux repères et de s'y mouvoir avec un minimum d'aisance? Voilà que d'une question : «comment ne plus travailler sur papier», découlaient beaucoup d'autres questions.

C'est par le désir de répondre à ces questions que j'ai commencé à étudier et à comprendre les méthodes de travail de l'architecte. À lire l'histoire de la représentation graphique pour proposer une voie d'exploration pour la conception qui étudie la «projétation» par les propriétés de l'objet, plutôt que par les primitives¹ géométriques. Pour proposer finalement une méthode d'aide à la conception par ordinateur, par des maquettes procédurales qui comprennent des opérateurs géométriques et sémantiques.

• La question de départ et l'hypothèse de travail

Ma question de départ prenait forme et s'exprimait de la manière suivante :

«Comment l'architecte peut-il tirer parti de la CAO considérant qu'il a développé un langage et des méthodes de travail adaptés à la représentation bidimensionnelle?»

Peu à peu, en réfléchissant sur les méthodes de travail, les outils, les médias utilisés par l'architecte pour représenter les diverses phases du projet d'architecture, je construisais l'hypothèse de travail qui a guidé toute ma recherche :

«la pleine exploitation de la relation concepteur-ordinateur va de pair avec un changement radical du langage pour la figuration».

Cette hypothèse de travail a demandé, avant tout, une recherche sur la conception, la représentation et la figuration architecturales, et ensuite sur les méthodes de travail des architectes pour me permettre de comprendre le blocage qui, nonobstant l'arrivée massive des ordinateurs et de la représentation visuelle sur écran, n'amène pas un changement du média papier ou des méthodes de figuration.

La recherche sur la conception, la représentation et la figuration m'a permis d'élaborer la problématique et la définition de mon champs théorique. J'ai pu comprendre que ma quête d'élimination du papier ne me conduisait pas dans la bonne direction, et que c'était ma façon d'aborder la question qui devait changer :

¹ «Les logiciels d'application de DAO construisent les objets virtuels à partir de vecteurs, c'est-à-dire de segments de droite orientés et définis par leurs coordonnées d'origine et d'extrémité : ce sont les primitives. Un cercle, un arc de cercle, une ellipse, une B-spline ou une courbe de Bézier sont des primitives». (De Paoli et Pellissier, 1992, p. 85)

« ... Pourtant moi je savais qu'il n'était pas fou. Il était juste "à côté". Je me souviens qu'une fois, oh! Il devait avoir à peine onze ans, il m'a mise au défi d'arriver à faire quatre triangles équilatéraux avec seulement six allumettes. Ce n'est pas facile, tiens tu vas essayer pour voir... Elle partit dans la cuisine, donna un coup d'œil à sa bouilloire et ramena six allumettes. Jonathan hésita un moment. Cela semblait réalisable. Il disposa de différentes manières les six bâtonnets, mais après plusieurs minutes de recherche dut renoncer.

— Quelle est la solution?

Grand-mère Augusta se concentra... Le mur était plus psychologique que réel, ça elle l'avait compris. Le fameux "il faut penser différemment!"...

... Augusta secoua l'engourdissement qui la gagnait. Un souvenir de sa propre jeunesse émergea. C'était une nuit d'hiver, elle était toute petite, et elle avait compris qu'il pouvait exister des nombres en dessous de zéro...3,2,1,0 et puis -1,-2,-3... Des nombres à l'envers! Comme si on retournait le gant des chiffres. Zéro n'était donc pas la fin ou le commencement de tout. Il existait un autre monde infini de l'autre côté. C'était comme si on avait fait éclater le mur du "zéro". Elle devait avoir sept ou huit ans, mais sa découverte l'avait bouleversée et elle n'avait pas dormi de la nuit. Les chiffres à l'envers... C'était l'ouverture d'une autre dimension. La troisième dimension. Le relief! Seigneur!

Ses mains tremblent d'émotion, elle pleure, mais elle a la force de saisir les allumettes. Elle en pose trois en triangle puis place à chaque coin une allumette qu'elle dresse pour que toutes convergent en un point supérieur.

Cela forme une pyramide. Une pyramide et quatre triangles équilatéraux.» (Werber, 1991, pp. 23, 285-286) (Figure 1)

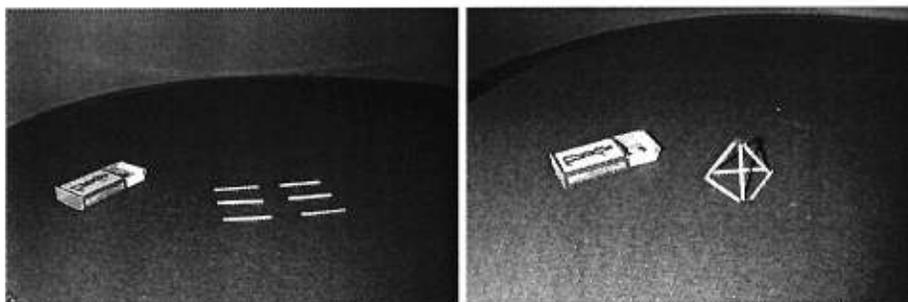


Figure 1. «Il faut penser différemment.» (B. Werber, 1991)

Ce n'était plus un problème de papier qui se posait, c'était de comprendre le blocage des architectes dans un univers informatique qui continue de reproduire sur écran une représentation bidimensionnelle de l'objet architectural. Cette exploration et la compréhension des méthodes de figuration m'ont amené à étudier la perception et le

traitement de l'information pour comprendre les méthodes de travail et proposer une nouvelle approche qui, tout en cherchant à modifier les divisions classiques du processus de création du projet d'architecture, englobe les paramètres non géométriques, que j'ai appelés opérateurs sémantiques comme les propriétés des matériaux ou la sensibilité que les acteurs-auteurs du projet architectural peuvent exprimer lors de la conception.

L'apport scientifique de ce travail consiste en ce qu'il démontre et valide l'efficacité d'une intervention sur certains de ces opérateurs sémantiques grâce aux outils informatiques qui permettent à l'architecte de se réapproprier une conception complexe du bâtiment par le biais des propriétés de l'objet et que l'informatique par son interdisciplinarité, permet d'intervenir dès le début du projet, pendant la phase de conception. En faisant participer tous les acteurs du processus de création de l'œuvre architecturale.

Cette approche permet de construire un modèle volumique en ajoutant une nouvelle dimension, c'est-à-dire : ajouter aux trois dimensions l'ensemble de paramètres qui est constitué de tous les événements de la construction et qui permet de construire un modèle en fonction de performances particulières que nous définissons en tant que fonctions génériques paramétrées. (Parisel, 1998)

Cette nouvelle approche par maquettes procédurales se veut un exemple d'intégration des propriétés de l'objet aux primitives géométriques. Cette intégration permet à l'architecte d'agir avec «l'unique variable qui mesure la force de son génie : le goût, lequel montre la singularité de l'homme en même temps que le caractère et l'organisation de la société qui l'emploie» dès le début du processus de conception et avec la collaboration de tous les acteurs. (Dalmas, 1986, p. 10)

Par ces travaux de recherche, je veux montrer que l'outil informatique permet d'ajouter une nouvelle dimension qui donne à l'architecte une nouvelle latitude dans la conception, que les simples lignes et points géométriques avaient proscrite, et il me permet de répondre affirmativement à la question de départ et de valider l'hypothèse de travail.

• La stratégie de recherche

«La pensée simple résout les problèmes simples sans problème de pensée. La pensée complexe ne résout pas d'elle-même les problèmes mais elle constitue une aide à la stratégie qui peut les résoudre. Elle nous dit : Aide-toi, la pensée complexe t'aidera». (1994, p. 111) Cette phrase d'Edgar Morin définit assez bien ma démarche dans un projet de recherche en aménagement.

En architecture, nous sommes confrontés à une complexité que je compare à l'habit d'Arlequin : une multitude de morceaux qui se tiennent, qui nous donnent l'idée d'un projet fini et qui constituent en même temps un canevas qui peut changer, être rapiécé et qui enveloppe l'homme et grandit avec lui.

Cette métaphore peut paraître trop simpliste, mais il est important pour un chercheur qui présente ses méthodes d'investigation de donner son approche épistémologique, particulièrement dans un domaine de recherche où il est difficile de tracer une séparation entre épistémologie et méthodologie. (Piaget, 1970)

La méthode de travail suivie pour cette thèse a été d'organiser le tout en trois parties :

- la première partie constitue une recherche sur la conception, la représentation et la figuration architecturales. Cette étude m'a permis de comprendre les approches de la conception assistée par ordinateur, de définir mon hypothèse de travail et de peaufiner ma question de départ. Dans cette partie, j'ai essayé de m'écarter des aspects techniques pour aborder le contexte général et développer tant la problématique que le cadre théorique, en présentant les approches épistémologiques qui guideront la deuxième recherche. Cette première partie est plus intuitive, elle sert de questionnement et d'exploration pour amener à la formulation de la problématique et à la définition du cadre théorique.
- La deuxième partie comporte une recherche en deux volets. Une première recherche de type exploratoire permet de définir une stratégie de participation des acteurs au processus de conception et une deuxième recherche de type étude de cas traite des méthodes de travail de l'architecte. Pendant ces recherches, les langages de communication visuelle, la perception et l'informatique, l'ordinateur et les méthodes

de représentation d'objets spatiaux en informatique me servent pour formuler une méthodologie pour l'observation d'un groupe d'architectes pendant la première phase de conception du projet. Cette analyse comprend une étude sur les objectifs, le contexte et les outils de travail de l'architecte. Cette investigation m'a amené à mieux comprendre la raison de la représentation bidimensionnelle et à saisir la problématique de la non utilisation de la CAO par les architectes. Elle analyse les blocages et le pourquoi. Cette partie traite de la question de départ. C'est-à-dire qu'elle pose la question : est-ce que l'architecte pourra se servir de l'ordinateur comme aide à la conception? Enfin, cette partie présente des pistes de solutions dans le cadre théorique exprimé.

- La troisième partie présente la recherche qui permet de valider les pistes de solution. Elle est précédée par une étude sur les langages pour la modélisation en architecture et ensuite par des exemples de langages informatiques. Ma stratégie a consisté à valider expérimentalement, par des essais de conception architecturale, le modèle d'un langage de figuration commun entre les acteurs. Ce modèle comprend des opérateurs qui décrivent les actions de modélisation architecturale dans l'environnement syntaxique d'un langage de programmation. Le plan d'expérimentation s'articule en une série d'expériences qui, ensemble, nous permettent de modéliser des actions par des opérateurs géométriques et sémantiques ainsi que d'agir sur le substrat :

«Une action est ce que fait une personne et par quoi elle réalise ses intentions. La réalisation d'une action implique des moyens d'action, comme des méthodes, des outils et un substrat. Pendant le processus de conception, lorsqu'il s'agit d'établir des caractéristiques visibles d'une solution architecturale, un acteur agit sur un substrat ; ...au début un acteur peut s'imaginer comment et sur quoi son action pourrait porter pour résoudre un problème à caractère spatial comme s'il s'agissait d'une action tangible. À un moment de ce processus de conception, le substrat devient matériel, il passe d'une représentation mentale à un résultat physique sur un chantier de construction ou sur un support comme le papier. Nous pouvons voir que le substrat d'une action est volumique et fait de matière, comme le bois ou la pierre.» (Tidafi, 96, p. 248)

Selon Tidafi, le substrat de l'idée architecturale est fait de matière et il possède une forme tridimensionnelle. Ce substrat possède de plus des attributs tels la couleur, la transparence, les dimensions, etc. En effet, une forme investie par la matière ou une matière formée possède de manière intrinsèque une couleur, des dimensions, etc. Et non seulement est-il crucial d'intégrer toutes les propriétés, en inscrivant dans la

définition même de l'objet ses qualités (densité, forme, couleur...), comme dans la nature, mais aussi est-il primordial d'intégrer ses propriétés conceptuelles que j'appelle sémantiques.

L'enjeu dans le processus de création est d'utiliser un langage pour la figuration qui rende compte de ces propriétés et qui soit généralisable à tous les acteurs pour qu'ils puissent, dans un esprit de conception coopérative, intervenir dans la figuration. Le terme de figuration désigne à la fois l'acte de figurer et son résultat, la figure produite, c'est-à-dire qu'une étude de la figuration ne se limitera pas aux figures, aux dessins, mais qu'elle portera également sur leur formation. (Boudon, 1988, p. 5)

Le but a été de prendre en considération divers travaux de modélisation, pour en extraire les opérateurs, identifier les lieux communs de même que de les valider en tant que maquettes procédurales. Deux autres expériences totalement originales, sur la description des opérateurs géométriques et sémantiques et plus précisément sur le théâtre romain réalisé à partir de lectures du traité sur l'architecture de Vitruve et les résultats des recherches sur la description des opérateurs par la modélisation déclarative de scènes, m'ont permis de conclure à l'originalité de la proposition avancée, de trouver une réponse à la question de départ et de valider mon hypothèse. Enfin, une conclusion présente ma contribution à la recherche sur l'aide à la conception par ordinateur et, à la lumière des expériences réalisées, présente des pistes de recherches nouvelles.

“Ma sopra tutte le invenzioni stupende,
qual eminenza di mente fu quella
di colui che s’immaginò di trovar modo
di comunicare i suoi più reconditi pensieri
a qualsivoglia altra persona, benché distante
per lunghissimo intervallo di luogo e di tempo?”

Galileo Galilei: Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo,
Tolemaico, e Copernicano - Firenze, 1632 (I giornata VII, 126-131)

Figure 2. « Mais sur toutes les merveilleuses inventions, quelle puissante pensée celle de celui qui imagine la façon de communiquer ses intuitions les plus cachées à toutes les autres personnes, même si lointaines par le lieu et le temps? » (G. Galilei, Dialogue sur les deux systèmes du monde *Tolemaico et Copernicano*)

PARTIE I : ARCHITECTURE ET CONCEPTION

Cette première partie présente une réflexion sur l'architecture vue comme un ensemble sensible qui, au-delà d'un assemblage géométrique de formes, reflète une réalité humaine dont les paramètres de conception ne sont pas seulement métriques. C'est aussi une réflexion sur la place de l'architecte, selon les époques et les œuvres architecturales et sur le processus de conception. C'est enfin une interrogation sur les nouvelles technologies pour comprendre comment l'architecte peut profiter de la CAO. Ce propos est donc inspiré de plusieurs domaines, l'architecture et le design, la conception des œuvres architecturales et l'informatique.

Le domaine de l'architecture, comme le souligne Vitruve, est strictement lié au cosmos et à l'univers «*as an architectural design in wich the laws of the cosmos and of architecture are clearly regarded as identical*» (Kruft, 1994, p. 24) et ne peut pas être étudié en dehors de sa structure complexe. (Figure 3) Et, comme le rappelle Le Corbusier, environ deux mille ans après, dans son texte *La maison des hommes*, l'architecture est un ensemble de gestes affectifs et rationnels :

«Car l'habitation et les locaux de travail, ainsi que leurs dispositions réciproques, ne font pas qu'envelopper, de toutes parts, la vie de l'individu et de la société, ils pénètrent dans l'intérieur de cette vie, ils l'imprègnent et ils la colorent par mille voix différentes, dont les unes sont affectives et les autres rationnelles ; ils détiennent ainsi ce pouvoir inouï d'être aptes à tout suggérer, depuis le désespoir et la haine, jusqu'à la joie dans la stabilité. Jusqu'à l'enthousiasme collectif et jusqu'aux gestes de résurrection.» (Le Corbusier, 1942, p. 8)

C'est la présence de ces paramètres, que l'on peut appeler aussi qualités ou performances, qui sont à la base de toute conception et qui définissent une sémantique des lieux et des espaces que je veux, petit à petit, mettre en évidence pour mieux comprendre comment l'architecte conçoit le bâtiment et comment ses outils de travail, comme le dessin, sont à la base de méthodes qui relèguent au second plan ou *a posteriori* les opérateurs qui contrôlent les «qualités» du bâtiment et que j'appelle, opérateurs sémantiques, pour les différencier des opérateurs strictement géométriques.

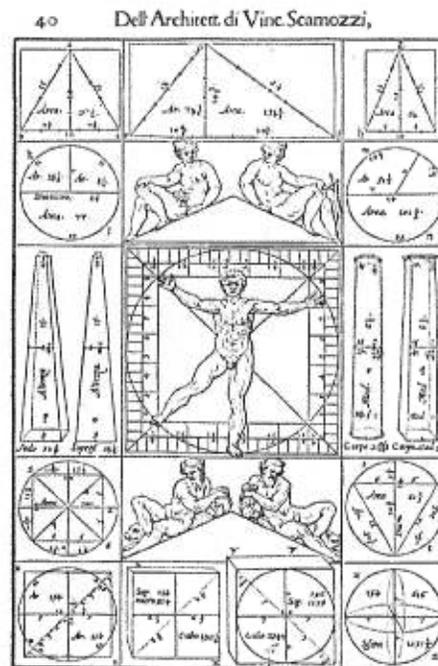


Figure 3. Diagramme de l'homme de Vitruve, Vincenzo Scamozzi, dans *L'idea della architettura universale* (H.-W. Kruft, 1995)

Ce débat n'est pas nouveau. Déjà au XIII^e siècle, les philosophes scolastiques traitaient de l'importance de la géométrie et de l'arithmétique, ainsi que de leur rôle dans l'interprétation du *cosmos*, en soulignant, comme Saint-Augustin, que la forme est un résultat numérique : «*formas habent quia numeros habent*». (Migne, 1877)

Cette anticipation de la pratique par la théorie a amené à coder une pratique reconnue (Germann, 1991) et a mené à des changements importants quant à la place de l'architecte et aux méthodes de définition du problème pendant le processus de conception et sa production matérielle. Selon les époques et les outils, le rôle de l'architecte se transforme. Avec le temps nous voyons apparaître la figure de l'ingénieur, l'humaniste se transforme en professionnel. Ce changement est présent aussi dans le domaine du design, qui se confond avec celui de l'architecture selon les cultures. A. Findeli, dans son livre *Le Bauhaus de Chicago*, nous rappelle en citant Moholy-Nagy, directeur de l'École de Chicago dans les années quarante, que «Le design n'est pas une profession, mais une attitude» et l'auteur souligne que : «À Chicago, c'est donc bien la méthode qui importe et non le contenu. Soulignons que cette polarité

professionnaliste/humaniste continue de diviser les écoles de design actuelles et qu'elle en constitue en somme le fondement». (Findeli, 1995, p. 156)

Enfin les réflexions de chercheurs sur la conception mettent en évidence deux caractéristiques importantes de la résolution de problèmes en architecture. D'une part la recherche d'une solution dépend non seulement des problèmes normatifs ou culturels (caractéristiques externes), mais aussi de caractéristiques «internes» et pour évaluer une solution, les acteurs du processus de conception doivent accepter le choix avant la réalisation de l'œuvre (Davidson, 1988). D'autre part ces réflexions soulignent le fait que l'architecte travaille avec un degré d'incertitude toujours présent.

Ces constats aideront à développer la méthodologie pour la deuxième partie de cette thèse qui est dédiée à l'étude du comportement des architectes et de leurs méthodes de travail pendant la toute première phase de conception.

Chapitre 1 Le caractère distinctif de l'architecture

Parler d'architecture signifie en premier lieu parler de conception, d'idée, d'image, de symbole, de l'être humain. Pourtant, estime B. Zevi, les traités sur l'architecture nous présentent souvent le bâtiment comme un phénomène plastique, étudié de l'extérieur, comme c'est le cas des peintures et des sculptures. Et il nous rappelle l'importance de trouver une méthode claire qui définisse l'essence de l'architecture :

«Si nous voulons "voir" l'architecture, nous devons d'abord trouver une méthode claire qui définisse son essence. Ceux qui ont réfléchi au problème savent que le caractère distinctif de l'architecture est qu'elle existe dans un espace tridimensionnel qui inclut l'homme. La peinture existe sur deux dimensions, même si elle en suggère trois ou quatre. La sculpture vit selon trois dimensions, mais l'homme en reste extérieur. L'architecture, au contraire, est comme une grande sculpture évidée, à l'intérieur de laquelle l'homme pénètre, marche, vit.» (1959, p. 10)

Le mot architecture, selon M. Légliose, a au moins trois significations : avant tout il renvoie à une discipline, puis il signifie aussi le processus de design, issu de l'anglo-saxon et qui à l'origine désignait la notion d'esthétique industrielle, le «faire l'architecture», et enfin, il réfère au résultat : le bâtiment et les ensembles de bâtiments. Et pour mieux préciser ces définitions il ajoute :

«Thus architecture is:

- *a corpus of knowledge, fairly loosely structured, not very unified, and split into fragments - what could be called a weak theory;*
- *a fairly complete vocabulary describing architectural objects and parts of building;*
- *doctrines and manifestos expressed in a discursive form, some of which give rise to corresponding trends of thought and works;*
- *a set of knowledge adequate for everyday practice;*
- *traditional techniques of representation - a codification for transmitting documents to others trades, freer from the constraints of realistic representation. Still freer forms of representation during certain phases, such as sketches, artist's drawing, etc.;*
- *plentiful, well documented analyses of past production;*
- *borrowing from other fields of knowledge.»* (1995, p. 57)

L'auteur conclut en disant que l'architecture est aussi ce que l'architecte fait, c'est-à-dire un travail intellectuel dans le domaine de la création culturelle (Boudon, 1994) ; un travail social, réunissant plusieurs partenaires tout en gérant les conflits entre eux par la négociation et les compromis (Boudon, 1995 ; Conan, 1989 ; Lawson, 1980) ; et un travail dont le résultat doit être produit dans un temps prédéterminé (Broadbent, 1973 ; Conan, 1989). Donc, l'architecture, tout en satisfaisant plusieurs critères, dont son utilisation et sa position dans l'environnement humain, est un ensemble de connaissances qui peuvent être extraites et transmises.

Pour transmettre ces connaissances, l'architecte se base sur une méthode représentative qui passe du croquis aux plans et coupes, une méthode qui subdivise l'espace en plans qui «le contiennent et le divisent». Cette approche est, selon B. Zevi, la cause principale de notre difficulté à comprendre l'espace en architecture. Finalement, le but des plans n'est qu'utilitaire, voire technique pour la réalisation de l'œuvre architecturale. Pourtant le bâtiment et sa construction ne sont pas seulement un ensemble de résolutions de problèmes techniques, ils sont «l'ensemble des mesures du vide, de l'espace interne dans lequel les hommes marchent et vivent». (Zevi, 1959)

Cet espace interne se projette à l'extérieur, dans la ville, dans le territoire, et il est un espace «sensible» où la complexité du projet architectural confronte les architectes entre le concevoir et le percevoir. G. Allen et C. Moore, en décrivant des bâtiments dans *L'architecture sensible*, font ressortir quatre concepts qu'ils jugent utiles à la compréhension de l'architecture : les dimensions, l'espace, la forme et l'échelle.

1.1 Les dimensions

Les dimensions, selon G. Allen et C. Moore, sont des variables indépendantes en ce sens que leurs changements, soit en augmentant soit en diminuant, ne modifient pas les autres variables. C'est par les trois dimensions que nous pouvons localiser un point dans l'espace. Ces auteurs affirment que la question des dimensions ne doit pas être considérée seulement du point de vue géométrique :

«nous pouvons aussi bien choisir autre chose, toute quantité que nous souhaiterions représenter. Une force, par exemple, est une dimension. Considérons une porte coulissante qui vient d'être refermée par son ressort

de rappel. Jusqu'où allons-nous pouvoir l'ouvrir en tirant sur la poignée? La réponse repose sur deux dimensions, elle dépend de deux variables indépendantes : notre énergie à tirer le ressort (une force) et la résistance qu'il offre (une autre force)». (1981, p. 4)

Pour faire une analogie, les cartes géographiques aussi sont un exemple où en plus des deux dimensions planaires, nous pouvons utiliser la couleur pour représenter les différents pays, ou encore des textures pour représenter la densité de population. Nous pouvons presque affirmer que ce plan bidimensionnel, la carte géographique, aura deux autres dimensions : la couleur et les textures, qui seront, de la même façon que les dimensions planaires, variables et variables indépendantes des autres.

Si nous regardons un plan d'architecte, nous pouvons dire qu'en plus des deux dimensions, que B. Zevi nous présente comme causes d'incompréhension de l'espace, nous avons, selon G. Allen, d'autres dimensions. Le mot plan lui-même suggère sémantiquement que derrière une représentation graphique il y a une intention, une action. L'architecte pour l'exprimer se sert de symboles, d'écrits et de conventions. Ce qui nous permet de voir à travers les multiples lignes d'autres «dimensions», telles la lumière, l'acoustique, la visibilité. Mais comment sont traitées ces autres dimensions, ces variables que G. Allen, définit indépendantes?

Sans banaliser la recherche spatiale faite par les architectes chaque fois qu'ils conçoivent un bâtiment, j'ai pu remarquer pendant mes années de pratique professionnelle et d'enseignement de l'architecture et des techniques de l'architecture, que la plupart du temps la conception est dédiée à la création de plans pour leur lecture et interprétation, et fait appel à une vision bidimensionnelle : peu de questions sont posées sur des problèmes tridimensionnels, par exemple, lors de l'observation des esquisses, sur la hauteur des pièces d'un bâtiment. (Figure 4)

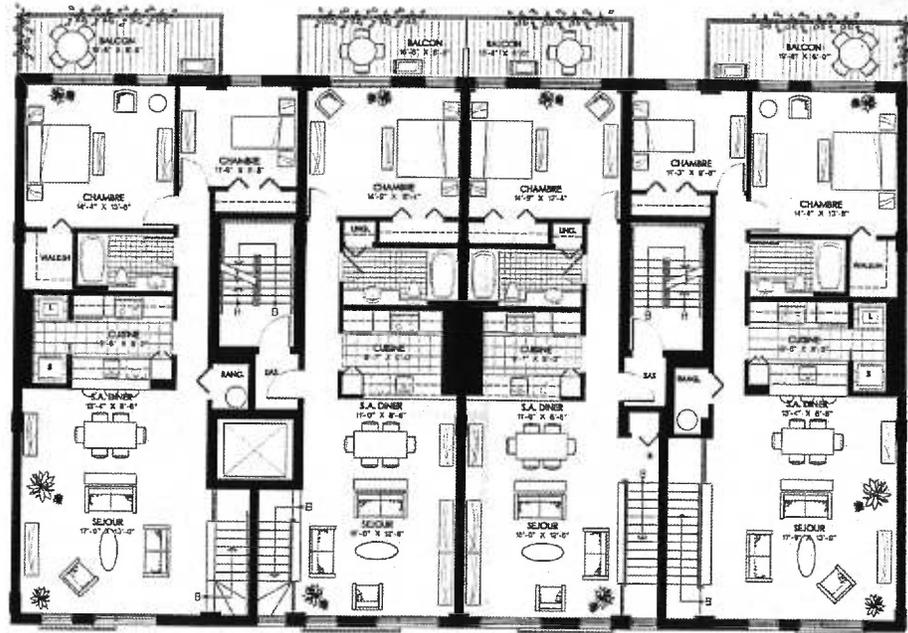


Figure 4. Les plans en architecture, document promotionnel des condominiums *Le Berri-Bonsecours* (Dupuis et Le Tourneux, architectes, Montréal, Canada)

Plusieurs études ont voulu démontrer que la nécessité d'une troisième dimension, lors de la conception, est fondamentale pour la compréhension de l'architecture (Tidafi, 1996) et qu'une quatrième, le temps, peut nous permettre de saisir les vues dans l'espace. (Zevi, 1959) Pourtant ces quatre dimensions cachent une autre dimension qui les englobe. En faisant appel à la théorie des ensembles on peut dire qu'il y a un ensemble «sensible» qui contient les quatre autres ensembles et qui le définissent. (Figure 5)

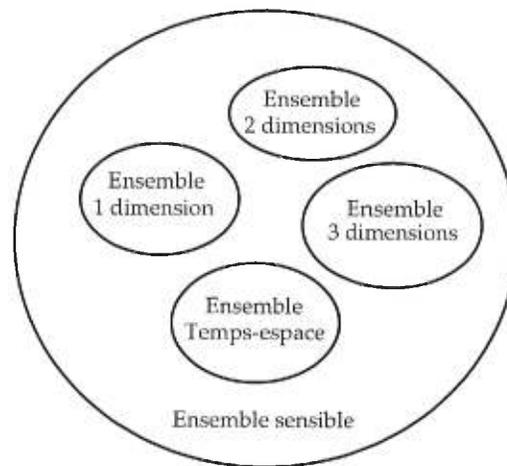


Figure 5. L'ensemble sensible

Cet ensemble sensible représente les variables que l'architecte prendra en considération pour la conception et pour la perception de l'objet architectural. Il dépend de l'être humain, de sa culture, de ses goûts et de ses connaissances : l'œuvre architecturale est «vue» selon la perception des acteurs qui sélectionneront les variables pour accepter et comprendre l'œuvre.

1.2 L'espace

L'espace, toujours selon C. Moore, est en architecture un espace particulier. En effet cet espace existe déjà, l'architecte étant celui qui le rend sensible en l'identifiant. L'utilisation des plans et coupes est un truchement pour créer des contours, et ces contours sont souvent tracés et dirigés par l'outil. J'ai pu souvent observer que pendant la réalisation des détails de construction, telle par exemple, l'exécution du linteau d'une fenêtre, une ligne droite ou au plus un triangle, priment sur l'arc non seulement à cause de la variable coûts de réalisation, mais plus souvent pour sa facilité d'exécution sur la planche à dessin.

Pour continuer, l'espace est défini par un contour, qui par un alignement visuellement parfait, peut faire oublier certaines variables que j'ai définies «sensibles»

comme la lumière. Combien de fois avons-nous assisté au débat d'espaces ouverts ou espaces fermés ou encore même, d'espaces amovibles.

Lors de mon examen pour obtenir le droit d'exercice de la profession d'architecte à Turin, en 1975, il fallait concevoir des espaces définis par des cloisons amovibles et rétractables pour des écoles. Il s'agissait de concevoir des modèles-espace qui permettaient l'utilisation de classes fermées pour des petits groupes, tout en offrant la possibilité d'ouvrir ces espaces pour créer un esprit d'«ouverture» d'agora favorisant la rencontre des étudiants et des professeurs. J'ai réussi mon examen, j'avais naturellement trouvé une solution, tout comme mes collègues : mon projet n'est resté qu'à la phase théorique, mais d'autres ont été réalisés, et pendant des années j'ai travaillé comme professeur dans ces espaces ouverts/fermés, pour me rendre compte de l'importance des liens entre le discours théorique sur les plans, les espaces et leur perception.

Un exemple utile à ce propos est celui de la réfection de la Faculté de l'Aménagement à Montréal. (1997) L'architecte, Gilles Saucier, a créé de grands espaces dans les ateliers, voulant favoriser et maximiser l'espace ouvert et la communication entre les étudiants. Résultat : le premier geste posé par les étudiants a été de se barricader, en construisant des «espaces de fortune» fermés, pour pouvoir mieux travailler. (Figure 6)



Figure 6. Photo de l'atelier de quatrième année à l'École d'architecture de Montréal (1999)

Ces exemples montrent la difficulté de définir la sensibilité dans le concept d'espace et en même temps, ils révèlent l'importance de trouver une méthode pour concevoir et percevoir l'espace sensible ; les trois dimensions et les plans ne pouvant pas toujours l'exprimer. Cette réflexion renvoie aussi à d'autres considérations d'ordre épistémologique sur le concept de méthode et à l'importance que nous donnons à la recherche d'une méthode comme solution au problème de la représentation en phase de conception. Est-ce que, comme le souligne l'approche positiviste, la méthode règle le problème?

1.3 Les formes

Les formes, selon C. Moore, donnent une valeur aux significations. Les architectes, d'une façon consciente ou non, donnent une forme qui est liée aux

significations physiques ou métaphysiques des acteurs du projet architectural. Les significations sont liées à l'esprit du temps, aux règles de conduite de l'humain, qui selon les époques en définit les proportions, l'équilibre la composition. La forme et sa relation avec la fonction fait l'objet d'un débat continu.

Plusieurs architectes et ingénieurs sont entrés dans ce débat, certains en y ajoutant de leur cru. Ce fut ainsi depuis Vitruve qui parlait de besoin-commodité-plaisir, dans une Rome antique qui se partageait entre les loisirs et la guerre, et jusqu'à Nervi qui présentait ses travaux sur les formes créées par les structures, dans une Europe où, après la Deuxième Guerre mondiale, la reconstruction et l'industrialisation étaient un moteur de discussion important sur les concepts de productivité et de fonctionnalisme.

Selon G. Allen, le débat entre forme et fonction des années soixante a disparu parce qu'une fonction ne peut pas par elle-même définir une forme dans le bâtiment : « Dans la mesure où un problème fonctionnel peut se résoudre à l'aide de formes variées, le choix dépend nécessairement des préférences du concepteur ». (1981, p. 14) Ce débat de la forme qui suit ou non la fonction peut être vu aussi selon une approche systémique qui scrute particulièrement le processus de conception. Dans ce cas, il ne s'agit pas de définir lequel vient avant l'autre, mais d'établir les rapports « dialectiques » entre les deux concepts. Le *fiasco*, par exemple, a pour origine une bouteille ratée par les souffleurs de verre. Les gens la récupéraient et en faisaient un empaillé pour la soutenir. Pourtant cette forme a servi et sert encore pour contenir le vin, tout particulièrement un certain type de vin. C'est le lien qui s'est créé entre forme et fonction qui a permis cette construction, et non la prédominance de l'un par rapport à l'autre. (Figure 7)

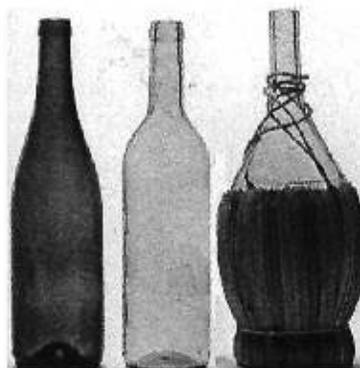


Figure 7. La forme ou la fonction : la bouteille ou le *fiasco*

C. Moore identifie trois catégories de définitions de forme : «celle que nous partageons tous (archétypique), celle que nous partageons avec une culture (culturelle), et celle qui est le produit de nos propres pensées (personnelle)». (1981, p. 14)

Les formes archétypiques étant celles qui naissent du rapport entre murs et colonnes, et des significations sémantiques, statiques et autres des uns par rapport aux autres, l'harmonie entre ces rapports peut être considérée comme un archétype. Les formes d'ordre culturel sont celles liées aux choix définis par nos connaissances. Le «gothique», dont la verticalité et l'élancement vers le haut sont les caractéristiques les plus apparentes, est souvent pris en exemple : les fenêtres en ogive, le mobilier pareillement dressé et les cathédrales élancées. D'autres faits, dans des périodes sociales et économiques particulières, comme la crise de l'énergie, ont participé à la naissance de formes culturelles nouvelles, avec l'édification des maisons solaires. (Figure 8)

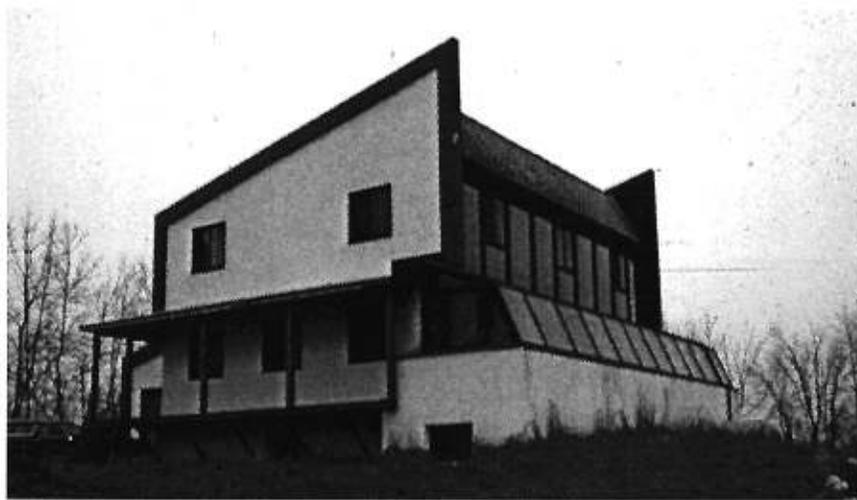


Figure 8. La maison Laurin (De Paoli et Pellissier, architectes, Mirabel, Canada)

Enfin, ces formes culturelles deviennent des préférences individuelles, selon nos connaissances et notre être, et elles varient dans le temps. Il m'est déjà arrivé de ne plus aimer la forme de bâtiments auxquels j'avais pourtant consacré de longues heures de recherche pour donner une signification «culturelle», comme dans le cas de l'élancement pour le gothique, qui signifie un élancement vers le soleil. (Figure 9)

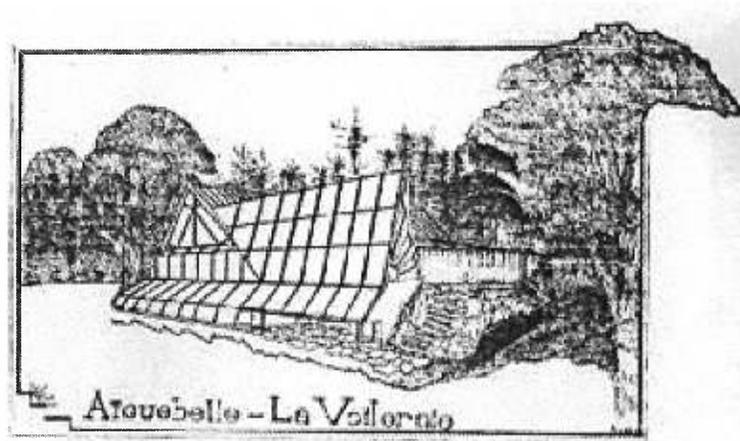


Figure 9. La maison Richer (De Paoli et Pellissier, architectes, La Minerve, Canada)

En conclusion, disons que la forme en architecture peut être une perception de la conception et l'attitude qui doit nous guider dans cette recherche sur le caractère distinct de l'architecture est d'être attentif à l'observateur et à la façon dont l'espace cognitif des acteurs est présenté pour qu'il puisse apprécier ce que l'œil voit et lui transmet.

Pour paraphraser C. Moore, qui nous décrit la fonction du dessin comme un outil pour représenter la forme en architecture, le modèle à questionner devra être considéré comme la chorégraphie de l'inconnu et du familier pour la réalisation de formes qui nous invitent à réagir et à être attentifs. (Moore et Allen, 1981)

1.4 L'échelle

L'échelle a souvent fait partie du débat entourant la forme et la signification des objets. C'est une notion difficile à saisir. Parlons-nous de l'échelle du plan ou de la maquette? Du rapport entre les objets du bâtiment? Ou encore, sommes-nous préoccupés par l'architecture à l'échelle humaine?

Ph. Boudon qui a dédié plusieurs études à ce sujet nous rappelle qu'une bonne compréhension de l'échelle est de la voir en terme d'opérateur et qu'il faut distinguer trois opérations : «d'une part, le choix d'un éclairage particulier qui permette une vision

claire du domaine dans lequel opérer [...] d'autre part, la décision de ce sur quoi va porter la mesure : l'entité à mesurer [...] et enfin la relation, entre ce qui est mesuré et l'instrument de mesure, qui suppose une pertinence». (1994, p. 151) À ces opérations, P. Boudon associe la notion de pertinence, en nous disant que la polysémie de l'échelle dénote la diversité des circonstances de mesure, le particularisme des opérations, et que l'échelle en tant qu'opérateur «est un concept ouvert, porteur de potentialité, d'une grande généralité et dont le sens ne précède pas l'opération mais se constitue dans l'opération proprement dite.» (1994, p. 153)

Pour poursuivre sur la complexité de ce concept, G. Allen dit que l'échelle est une comparaison d'une chose avec une autre. Par exemple que «l'échelle humaine doit vouloir dire que l'objet est à la taille de l'homme». (1981, p. 20) À ce propos, plusieurs études d'ergonomie et de design nous rappellent les tailles que doivent avoir les objets courants et en particulier le mobilier intégré, où les dimensions sont associées à la taille moyenne du corps humain, sans quoi ils ne pourront pas être utilisés.

Ce concept cache pourtant un vice de forme qui ne nous permet pas de «personnaliser» l'échelle. Ce qui signifie par exemple que certaines voitures font état de leurs sièges ergonomiques, en oubliant l'inconfort d'une personne dont la taille n'est pas comparable à celle de la clientèle cible. Ou encore, lors de la conception d'une cuisine, l'accès aux tiroirs ou aux boutons de contrôle d'une cuisinière ne tient pas compte des mouvements limités d'un handicapé. (Figure 10)

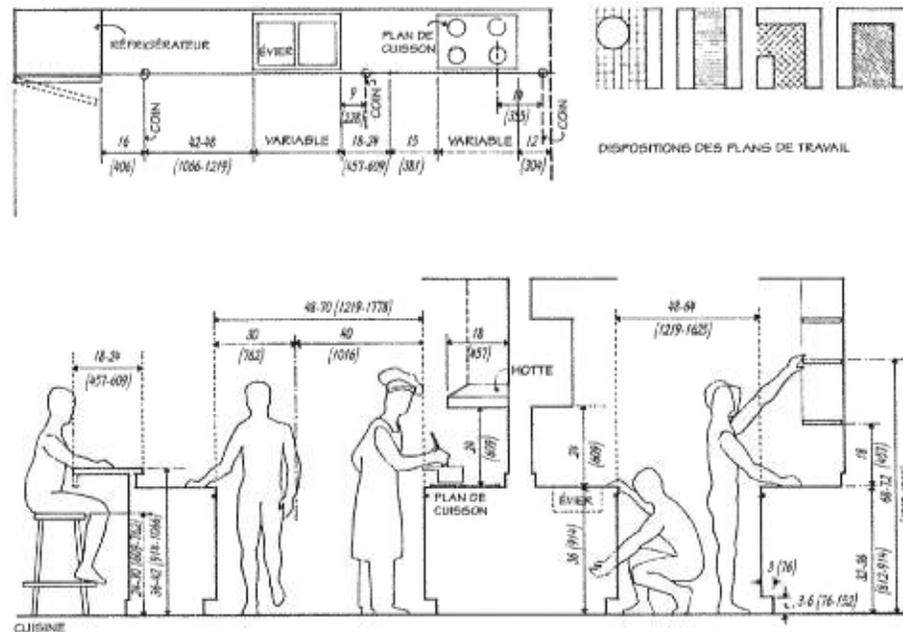


Figure 10. Exemple d'étude ergonomique, *Le design d'intérieur* (D.K., Ching, 1995)

Ce que je retiens de ce concept c'est qu'il faut poser le problème des relations entre les objets. Un objet est un système en équilibre ainsi qu'un bâtiment est un système d'objets-systèmes en équilibre. Il s'ensuit que : ce sont les relations dialectiques, les processus de conception qui guident la modélisation en architecture.

1.5 La compréhension des paramètres pour la modélisation du bâtiment

Jusqu'à présent, l'architecture, par les méthodes de représentation qui utilisent le papier comme outil de communication, ne permet pas une complète compréhension spatiale. Les perspectives qui donnent l'illusion de la troisième dimension introduisent en même temps, comme biais, l'angle visuel de l'architecte : les acteurs ne peuvent pas se mouvoir autour et dans cet objet pour le posséder. Depuis Dédale, appréhender l'espace d'en haut nous fascine et c'est ainsi que nous dessinons des perspectives à vol d'oiseau et que nous présentons des maquettes permettant de voir un espace non «vécu» parce que, dans la réalité quotidienne, nos yeux se promènent à environ un mètre et demi du sol ou un peu plus. De la même façon, les représentations fidèles du

bâtiment introduites depuis le début de l'enseignement de la géométrie descriptive dans les écoles polytechniques de France, représentent l'image en faisant souvent abstraction de la matière et plus encore de l'esprit de l'objet architectural.

J. Sakarovitch nous rappelle qu'à la fin du XVIII^e siècle, Gaspard Monge, fondateur de l'École polytechnique, dégage en un corps de doctrine cohérent et abstrait, appelé la «géométrie descriptive», les tracés de géométrie pratique. Ces tracés selon les règles de l'art supplanteront les méthodes précédentes, «en les rejetant dans une sorte de préhistoire a-géométrique». (1997, pp. 17-18)

À cet effet, il est intéressant de saisir ces méthodes précédentes. J. Sakarovitch, en prenant par exemple la taille des pierres, nous dit que comme pour l'architecture, où l'on a construit avant et dessiné ensuite, ce n'est «vraisemblablement pas un perfectionnement des tracés géométriques qui a engendré celui des méthodes de taille mais l'inverse - du moins dans un premier temps. Le ravalement définit la projection, l'équarrissement en part, et le basculement d'une technique de taille vers l'autre produit du géométral plus qu'il n'est engendré par lui». (1997, p. 17) Et il souligne que pendant l'Antiquité et le Haut Moyen Âge, la construction d'un bâtiment est pensée dans le sens dans lequel elle s'effectue, c'est-à-dire de bas en haut, et qu'à l'Époque gothique, comme le souligne Viollet-le-Duc, c'est «la chose portée qui impose [...] les formes de la chose qui porte» (1854) ce qui a mené à penser la construction d'une nouvelle manière de haut en bas.

En effet, l'objet architectural a comme fonction de remplir un espace vide pour le délimiter par exemple, si nous devons construire une salle de théâtre voûtée, «c'est la voûte qui couvre l'espace vide... qui est la partie essentielle de la structure ; c'est donc la voûte, sa forme, son étendue et son poids, qui commande la disposition, la forme et la résistance des points d'appui. Par déduction logique, c'est la voûte qu'il s'agit d'abord de tracer et c'est son tracé qui doit imposer celui des piliers et des murs». (Viollet-le-Duc, 1854) J. Sakarovitch poursuit en disant que cette inversion dans la pensée constructive est fondamentale par rapport au problème de la représentation architecturale parce qu'elle introduit la projection de manière physique, matérielle, concrète. «Si le plan antique ou roman est tracé au sol, l'implantation du bâtiment sur le terrain, le plan gothique devient vue du dessous, c'est-à-dire prend son sens actuel». (1997, p. 17)

La réalité du bâtiment ne peut pourtant pas être contenue seulement dans les trois dimensions qu'encore aujourd'hui, les perspectives cherchent à nous donner comme complément aux plans et élévations, riches en détails presque parfaits. Une autre dimension s'impose : une quatrième dimension que les peintres cubistes du début du siècle ont appelé le temps et que les chercheurs appellent aujourd'hui l'espace-temps.

Cette quatrième dimension ne doit pas être la multiplication des perspectives et points de vue, comme c'est le cas de plusieurs programmes et jeux virtuels, parce que nous ne ferions que reproduire les méthodes actuelles, sans comprendre l'espace. Imaginons la construction d'un mur et la pose de briques. À chaque brique que nous ajoutons nous faisons un déplacement dans le temps et aussi dans l'espace, tout en ajoutant à ces gestes formels et temporels le savoir-faire et le savoir, la technique et les méthodes de construction du mur, l'expérience et les propriétés de l'objet. (Figure 11)

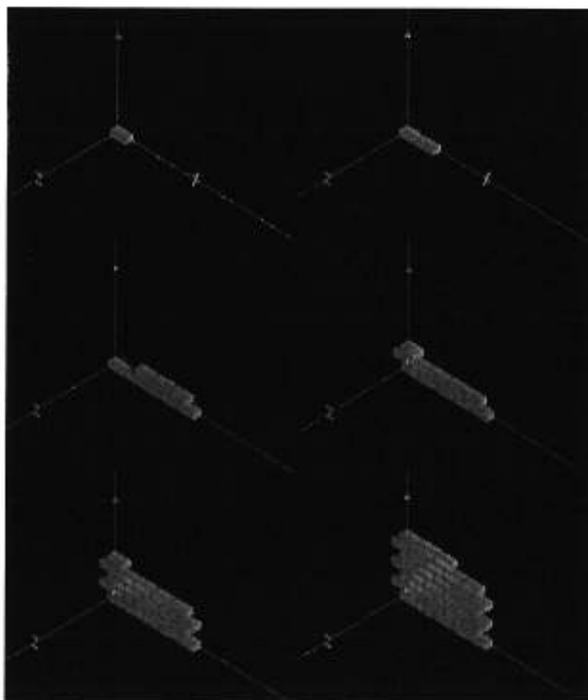


Figure 11. La quatrième dimension : espace et temps , savoir et savoir-faire (M. Bogdan, 1999)

Pour conclure, disons que l'architecture est le résultat concret d'une idée complexe du bâtiment et qu'elle est fondamentalement un geste d'inclusion des paramètres qui la définissent. Duplay nous rappelle à ce propos que l'architecture est un langage morphologique qui s'exprime par systèmes combinatoires (1985) ; ces systèmes ne

s'expriment pas seulement par un vocabulaire morphologique, mais aussi par un vocabulaire fonctionnel du point de vue des performances du bâtiment.

Ce sont ces performances, comme l'acoustique, que j'ai appelées les opérateurs sémantiques que j'ai voulu modéliser et qui ont été à la base de ma préoccupation tout au long de mes recherches. Ces performances qui font que l'architecture et son espace interne ne sont pas un contour abstrait de l'objet, mais comportent des propriétés qui se prolongent dans la ville, dans le bâti et le non bâti environnant.

La compréhension de ces paramètres permet la modélisation des opérateurs. Parler de modélisation peut être ambigu et je trouve important à ce stade de la présentation de faire un petit rappel de la notion de modèle en architecture. À ce propos, A. Coste souligne l'importance de bien saisir ce concept et d'éviter les confusions possibles en architecture. En effet, cette notion de modèle trouve son origine dans le mot *mimesis* qui signifie imitation de la nature ou d'un objet que l'on a identifié comme exemplaire. La notion de modèle signifie aussi, dans un contexte lié aux mathématiques et aux physiques, élaborer un schéma au niveau des idées pour s'approcher de la réalité complexe d'un phénomène. Par modèle entend donc aussi bien «l'objet de référence doté de qualités exemplaires, susceptible d'être copié, que l'objet théorique porteur de l'ensemble des propriétés de la réalité empirique dont il doit rendre compte», et non pas seulement une forme réduite d'un objet de grande taille, ce qu'en architecture nous appelons couramment une maquette. Pour en expliquer la portée A. Coste rappelle un exemple dans l'histoire de l'art en faisant référence à :

«l'œuvre de Philippe Brunelleschi. «Inventeur» de la perspective, il en élabore les lois jusqu'ici approchées par l'expérimentation mais non encore décrites de manière scientifique. Avec la coupole de Sainte-Marie-des-Fleurs à Florence, Brunelleschi produit un édifice fondateur pour la renaissance italienne, qui prend par la suite valeur de modèle architectural et constructif.» (1997, p. 21)

Enfin, notons que les architectes utilisent souvent et de manière différente le concept de modèle, selon qu'il s'agit de représentation ou d'école de pensée, d'un exercice d'abstraction d'une réalité physique et/ou de la concrétisation matérielle de cette idée.¹ Ce qui me fait dire qu'en architecture, on a toujours eu recours au modèle

¹ «Comme le remarquait S. Bachelard lors d'un colloque interdisciplinaire, le concept de «modèle» présente – plus encore peut-être que celui de «système», un spectre très large de significations qui va des formalismes mathématiques aux maquettes et aux moulanges, significations qui, de plus, n'offrent pas de

pour concevoir et comprendre et que, comme le souligne A. Coste : «Il n'est donc pas exclu de penser que le modèle théorique élaboré à partir d'une réalité complexe puisse motiver à son tour une production nouvelle. L'histoire de l'architecture décline ainsi la notion de modèle sur des registres multiples». (1997, p. 21)

Ce caractère distinctif de l'architecture, en tant qu'ensemble combinatoire qui n'utilise pas seulement un vocabulaire morphologique, mais aussi un vocabulaire fonctionnel du point de vue des performances (des qualités) du bâtiment, amène à prendre conscience de l'idée d'interdisciplinarité et souligne la nécessité de comprendre la conception du projet d'architecture.

types nettement tranchés et donnent lieu, souvent, à des interférences.» (Bachelard, 1979). Le mot «modèle», en effet, vient du latin *modulus* (diminutif de *modus*, mesure), et c'est, au départ, un terme d'architecture qui désigne «la mesure arbitraire servant à établir les rapports de proportions entre les parties d'un ouvrage d'architecture. (Bachelard, 1979, p. 15) Le mot *modulus* a donné lieu à deux importations en français, au Moyen Age et à la Renaissance : le mot «moule», d'abord, puis, au XVI^e siècle, par l'intermédiaire de l'italien *modello*, le mot «modèle». Au plan du sens, le mot «modèle» présente, tout de suite une ambiguïté frappante puisqu'il peut désigner tantôt l'original, l'idéal à atteindre, tantôt la copie, la simple réalisation ou interprétation. Comme dans le mot «exemple», tour à tour pôle d'imitation et exemplaire quelconque, se coalisent dans le mot «modèle» ce qu'on pourrait appeler la norme abstraite et la figuration.» (Parrocchia, 1993, Bachelard, 1979, p. 3-15)

Chapitre 2 La conception à l'ombre de l'architecture

Le trente-quatrième numéro des *Cahiers de la recherche architecturale* consacré à la conception et aux processus qui l'accompagnent s'intitule : *La conception à l'ombre de l'architecture* ; en précisant d'entrée de jeu que ce titre n'est pas neutre, parce qu'il ne désigne pas seulement le projet, mais aussi les activités humaines qui l'entourent : la conception étant la formation d'un concept, d'une idée, d'une invention et l'action de concevoir s'appliquant à un objet. La conception est la description du résultat et le processus de son obtention, (Figure 12) notion plus large que celle de design, issu de l'anglo-saxon et qui référerait à l'origine à la notion d'esthétique industrielle.

Depuis une trentaine d'années, la recherche architecturale sur la conception a pris «forme» ; et elle a été et demeure le lieu de débats fondamentaux qui mettent en crise l'existence même du rôle de l'architecte et l'enseignement de cette discipline, bonne élève de l'École des beaux-arts. La prise de conscience d'une idée d'interdisciplinarité et un besoin de compréhension de la conception du projet d'architecture comme thème de réflexion font, qu'à partir de la fin des années soixante, plusieurs théoriciens avancent des hypothèses sur les méthodes de design et cherchent souvent dans le nouveau domaine de l'informatique une réponse logique à leurs questionnements.

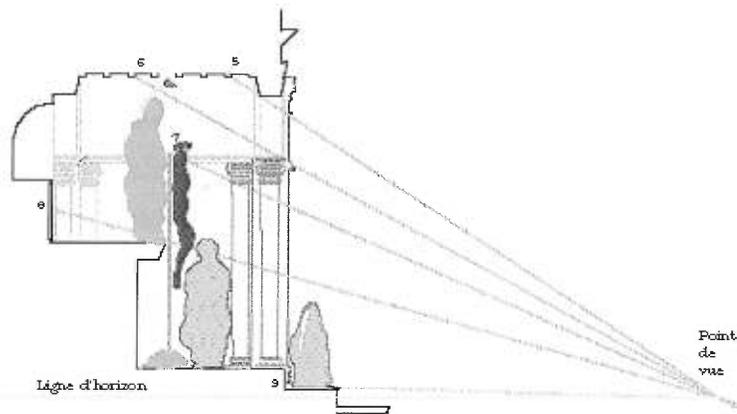


Figure 12. La conception : description du résultat et processus de son obtention (La Trinité par Masaccio (1425) Santa Maria Novella Florence, Italie)

Un des pionniers de ces questionnements, Christopher Alexander, a souligné dans une entrevue sur la nouvelle méthode de design qu'il proposait (par l'utilisation du *pattern language*) que pendant des millénaires, les hommes ont bâti eux-mêmes leurs demeures et que cela a permis la naissance de cités belles et harmonieuses, mais qu'aujourd'hui (1975) les hommes ont perdu une partie de cette capacité : «les gens sont tellement ignorants de ce qui se fait, qu'ils ne suivent pas la tradition : si on les laisse faire, tout va devenir horrible! Ils ne savent pas comment s'y prendre, comment installer la lumière, où placer les couloirs pour faciliter la circulation, où mettre la cuisine, etc.» C'est pour répondre à ce manque que C. Alexander créait les *pattern languages*, qui auraient permis aux gens «de fabriquer eux-mêmes ces constructions mieux qu'il ne l'ont jamais fait dans l'histoire». Avec ces propositions naissait une nouvelle vision du projet d'architecture qui aurait dû permettre aux gens de «reprenre le contrôle de la construction».

La notion de projet devient une préoccupation de plus en plus grandissante et accentue la présence de deux écoles de pensée qui se côtoient. P. Chupin, dans une récente recherche sur les phases analogiques du projet d'architecture en situation pédagogique, nous présente la dissociation qui fractionne les écoles d'architecture en deux pôles : «une polarité qui témoigne, peut-être d'une ambivalence (étymologiquement deux valeurs) au sens fort du terme, de la notion de projet. C'est au filtre de l'opposition entre le contrôle et l'incertitude, que l'on parvient à rendre intelligible cette distinction entre deux positions». (1998, p. 34)

Pour expliquer cette polarité, P. Chupin nous dit qu'il est «normal» de dire que le projet d'architecture est une recherche de mise en ordre et d'un contrôle des différents processus, mais que l'incertitude et le chaos comportemental, comme caractéristiques du projet d'architecture, paraissent plus inhabituels. Et pourtant, ces deux points de vue se côtoient. Pour nous présenter ces positions, l'auteur fait appel aux deux points de vue de Philippe Boudon et de Christian Girard.

P. Boudon présente depuis ses premières œuvres au début des années soixante-dix, un concept qu'il appelle l'architecturologie et qui est un effort de clarification fondamentalement théorique dont les objectifs se situent, selon P. Chupin, «hors de toute perspective opératoire». Pour appuyer cette définition sur l'architecturologie, P. Boudon nous dit que :

«Il conviendrait donc (sans préjuger à l'inverse que ce soit la seule posture possible) de ménager la possibilité d'une interrogation à l'endroit de l'architecture, qui mette entre parenthèses visée opératoire et souci d'efficacité. Or si les pages de Rossi visent le «projet», si les propos de Norbert-Schulz se veulent «moyens d'action» et si Alexander nous propose une méthode, leurs réflexions s'inscrivent, bien que de diverses manières, dans l'architecture dès lors que ce terme véhicule légitimement l'idée de son propre projet, et non dans une architecturologie si par ce terme on entend signifier une visée de connaissance non chargée de souci opératoire inhérent à l'architecture et, inversement, soucieux d'une connaissance qui n'est pas l'objet premier de l'architecture, fût-ce une connaissance d'elle-même.» (Boudon, 1992, p. 84)

En commentant ce texte, J.-P. Chupin nous dit que présenter cette dissociation entre visées de connaissances et visées opératoires signifie séparer le savoir du savoir-faire et, en même temps, s'insérer dans ce courant de théoriciens des sciences modernes qui ont créé une rupture épistémologique entre théorie et pratique ; et pourtant, dans la pratique professionnelle, j'ai maintes fois pu constater comment l'une et l'autre sont totalement interreliées. L'auteur nous rappelle aussi que l'architecturologie cherche à modéliser le processus de «conception», approche qui se situe dans le «sillage des sciences de la conception et de l'épistémologie constructiviste». (1998, p. 36)

Pour nous convaincre qu'il y a une attitude contraire qui cherche à nier la possibilité d'une clarification, J.-P. Chupin, après avoir analysé les textes de Philippe Madec et Michel Corajoud, souligne qu'il s'agit d'une approche culturelle ou artistique du projet d'architecture. Cette approche réfute l'esprit de système et considère le projet comme «une conjonction forcément mystérieuse et insaisissable : compréhensible uniquement dans une pratique concrète du projet». (1998, p. 37) Tant que l'on peut comparer cette approche à la foi il n'y a plus rien à dire! L'auteur fait ressortir de la réponse de P. Madec au questionnement de M. Corajoud sur la façon de «mettre à jour le fonctionnement même du projet» que «le processus du projet est non intégrable et que le «projeteur»¹ ne peut atteindre l'essence du développement projectuel». (1998, p. 39)

¹ Dans ce dialogue, présenté par R. Prost (1995) dans *Concevoir, inventer, créer. Réflexions sur les pratiques*, Madec évite de parler de concepteur lui préférant le mot projeteur. Ce qui est lié à l'étymologie latine reprise dans la langue italienne *progettista*.

Cette prise de position sur l'incontrôlable est bien expliquée dans *Architecture et concepts nomades* de C. Girard où la notion de concept-nomade s'oppose à celle d'architecturologie. Se basant tout particulièrement sur les textes de Feyerabend et G. Deleuze, l'auteur propose une anti-théorie de la transdisciplinarité du projet d'architecture et il critique la possibilité de faire une théorie du projet : «À lire certains textes, on se demande si le thème d'une théorie du projet n'a pas été avancé par défaut ; parce que, précisément, on échoue à fonder une théorie de l'architecture. Une théorie du projet, dans son énoncé, serait une théorie scientifique d'un élément essentiel d'une pratique (l'architecture) incapable de se forger pour elle-même une théorie scientifique». (1986, p. 196)

La présentation de ce débat épistémologique sur la conception et l'architecture revêt une grande importance dans le débat actuel sur l'adoption de l'outil informatique en architecture, parce qu'il nous confronte à une polarité entre le contrôle et l'incertitude. Est-ce que nous pouvons contrôler la conception, l'architecture? Et par le fait même, est-ce que les outils informatiques peuvent intervenir dans ce contrôle, et comment? Est-ce qu'une modélisation du processus de conception ou du projet peut se transférer dans une logique ou une non-logique informatique?

Les concepts de projet et de conception interposent une autre problématique épistémologique, c'est-à-dire qu'ils introduisent une problématique sur la conception comme une activité personnelle ou collective, comme une invention singulière ou plurielle.

Selon J. Sauterau, dans son introduction au cahier de la recherche architecturale *Concevoir*, les recherches des théoriciens de la conception et du projet «semblent être organisées autour de quatre orientations :

- la première consiste à fonder de l'intérieur l'étude de la conception de l'architecture en tant que discipline scientifique : c'est l'«architecturologie» de Ph. Boudon ;
- la deuxième applique à l'architecture un savoir extérieur à son propre champ, la sémiotique, par exemple ;
- la troisième regroupe des démarches herméneutiques dont la transversalité était propre à chaque chercheur, qui faisait appel à la construction, l'histoire, la sociologie, la philosophie, la psychanalyse, etc. ;
- la quatrième veut être avant tout élaboration d'une doctrine et d'une éthique. La «théorie éclatée» ainsi constituée n'était pas capable de

trouver le caractère opératoire du savoir globalisant des traités classiques.» (1993, p. 8)

Mais l'auteur ajoute que nous observons depuis peu une évolution de la recherche vers l'analyse du projet, et plus précisément vers le thème fédérateur des «savoirs de la conception», ce qui permet d'entrevoir de nouvelles avenues d'exploration de la conception. Ces avenues comprennent les sciences cognitives et l'intérêt pour la pensée et les objets techniques matériels et immatériels, ainsi que les situations virtuelles. Finalement, le processus de la conception en architecture suppose autant de points de vue que d'observateurs, autant de démarches que d'auteurs (1993). Ce sera à nous d'analyser les orientations pour repérer quelques démarches de conception architecturale.

Comme J.-P. Chupin (1998) nous l'a fait remarquer, ces démarches vont de l'architecture du contrôle à celle de l'incertitude : d'un côté, les courants qui, par une réflexion épistémologique sur la conception comme une «idée neuve», visent à une connaissance scientifique de la conception (Ph. Boudon et Deshaies) ; de l'autre l'approche philosophique qui d'une façon critique s'interroge sur l'observabilité du processus de conception. Entre ces deux approches, comme l'a identifié J. Sautereau, nous retrouvons l'approche qui passe par la sémiologie, par les images et les métaphores qui décrivent le processus de conception ; ou encore par la manière pragmatique, ayant comme toile de fond la systémique d'Herbert Simon, et par les travaux de Robert Prost sur une éthique de la conception ; ou par les travaux plus «sociologiques» de Michel Conan sur la façon dont un processus collectif peut induire un projet ; et enfin par les recherches de Bernard Deloche sur la fabrication d'un logiciel d'agencement et de classification qui approche la conception par la forme.

2.1 Les «représentations» du processus de conception

À chaque moment de l'histoire, par les modes de vie, les pratiques sociales quotidiennes et le langage, l'humanité produit une structure imaginaire. C'est dans ces termes que F. J. Varela, introduit son essai, *Invitation aux sciences cognitives*, dans lequel il écrit que «la science est une section de ces pratiques sociales, et les théories scientifiques de la nature ne représentent qu'une dimension de cette structure

imaginaire». Il est bien démontré, dit-il que l'imagination scientifique se transforme radicalement d'une époque à l'autre et «que la science est plus une épopée qu'une progression linéaire. L'histoire humaine de la nature mérite d'être racontée de plus d'une façon». (1996, p. 10)

Poursuivant son introduction aux sciences cognitives, F.J. Varela nous rappelle que l'histoire humaine de la nature correspond à une théorie de la connaissance de soi. La représentation de la conception aussi est une représentation de soi, avec sa structure imaginaire, dont les méthodes n'ont pas évolué d'une façon linéaire. Pour cela, je préfère ne pas présenter les différents théoriciens de la conception selon un ordre prédéterminé. Il est plus utile pour notre recherche de passer d'un théoricien à l'autre par des liens dialectiques. De cette façon, chaque théoricien prend sa valeur et son importance, indépendamment de toute considération hiérarchique ou préférentielle.

Mon but est avant tout de comprendre ces liens pour voir si la présence de l'informatique peut nous aider à les explorer. Comme le dit J.F. Varela, pour la première fois dans l'histoire du monde occidental, la société commence à être confrontée à des questions telles que : «l'esprit est-il une manipulation de symboles? Le langage peut-il être compris par une machine?» Est-ce que la machine ordinateur peut être un lieu de rencontre entre les acteurs du processus de conception? Ou est-ce que cet outil apporte une compréhension nouvelle du traitement de l'information? F.J. Varela met en question le lien entre connaissance et traitement de l'information :

«L'information dirais-je ressemble à un *phlogistique*¹ moderne qui expliquerait la structure de la connaissance en s'appuyant sur un ordre des choses préexistant. La clé de voûte de la cognition est précisément sa capacité à exprimer la signification et les régularités ; l'information doit apparaître non comme un ordre intrinsèque mais comme un ordre émergeant des activités cognitives elles-mêmes. Si cela se vérifie, notre compréhension naïve des relations que nous entretenons avec ce monde changera dramatiquement.» (1996, p. 13)

Comme on l'a déjà souligné, la plupart des textes qui traitent du processus de conception en architecture, présentent C. Alexander comme l'un des fondateurs de

¹ «Nom désignant le fluide imaginé au XVIII^e siècle comme la substance même de la chaleur pour expliquer certains phénomènes physiques dont rend compte aujourd'hui la thermodynamique, avec des modèles fort différents.» (Varela, 1996, p. 13)

l'approche méthodologique sur le processus de conception. Dans *Notes on the Synthesis of Form* (1964), C. Alexander nous dit que son travail consiste à proposer une nouvelle organisation et une forme nouvelle pour «piloter» le processus de conception et pour résoudre les problèmes fonctionnels de plus en plus complexes. Selon lui, les concepteurs n'étant pas toujours à la hauteur pour trouver une solution à un problème donné, se rabattent sur des solutions arbitraires qui par le fait même laissent le problème irrésolu. Son travail, joint à ceux de J.C. Jones, G. Broadbent et C. Eastman, a permis d'éclaircir le processus de conception et de changer la vision qui jusqu'alors le définissait comme un processus intuitif et non rationalisable. (Rivero, 1977)

2.2 La définition du problème pendant le processus de conception

Un des premiers résultats des études de décomposition, de définition du problème et de composition pendant le processus de conception, a été la décomposition en tâches bien définies des phases du processus pour éventuellement le traiter avec des ordinateurs. V. Rivero nous rappelle que les taxonomistes architecturaux se sont tout de suite mis à l'œuvre pour définir et classer ces tâches qui, selon l'auteur, n'ont pas encore trouvé de consensus. (Figure 13)

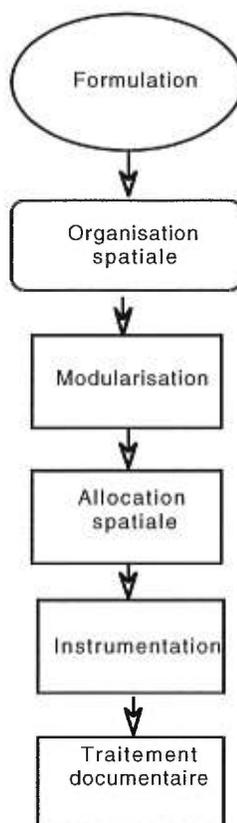


Figure 13. Exemple du schéma de C. Alexander selon V. Rivero (1977, p. iii.3)

Dans ce modèle, par exemple, V. Rivero définit la formulation comme l'énoncé du futur contenu socio-culturel du projet : c'est la phase de spécification du projet qui produit comme résultat ce qu'en architecture on appelle couramment le «programme». L'organisation spatiale permet de caractériser les espaces qui contiendront les activités selon les propriétés physiques et mécaniques telles les surfaces ou l'isolation thermique. La modularisation est une phase optionnelle à utiliser lors d'une rationalisation des coûts par l'utilisation de composantes standardisées. L'allocation spatiale produit une configuration et une organisation spatiales. L'instrumentation habille l'enveloppe définie dans la phase précédente et enfin, le traitement documentaire génère tous les documents nécessaires à la production du produit architectural : plans, métré, etc.

En ayant ces mêmes préoccupations, dans une série de cahiers sur les méthodes de construction et sur l'auto-construction que je publiais en 1984, j'écrivais que «avant de chercher à tracer quelques plans que ce soit, il sera sage de créer un diagramme de relations des pièces tenant compte de l'orientation de la maison, des accès possibles, des particularités et des habitudes de la vie de famille. La production de ce diagramme peut demander beaucoup de temps, mais cet effort s'en trouve amplement récompensé par la facilité que l'on éprouvera par la suite à le transformer en plan proprement dit. (De Paoli et al., 1984) (Figure 14)

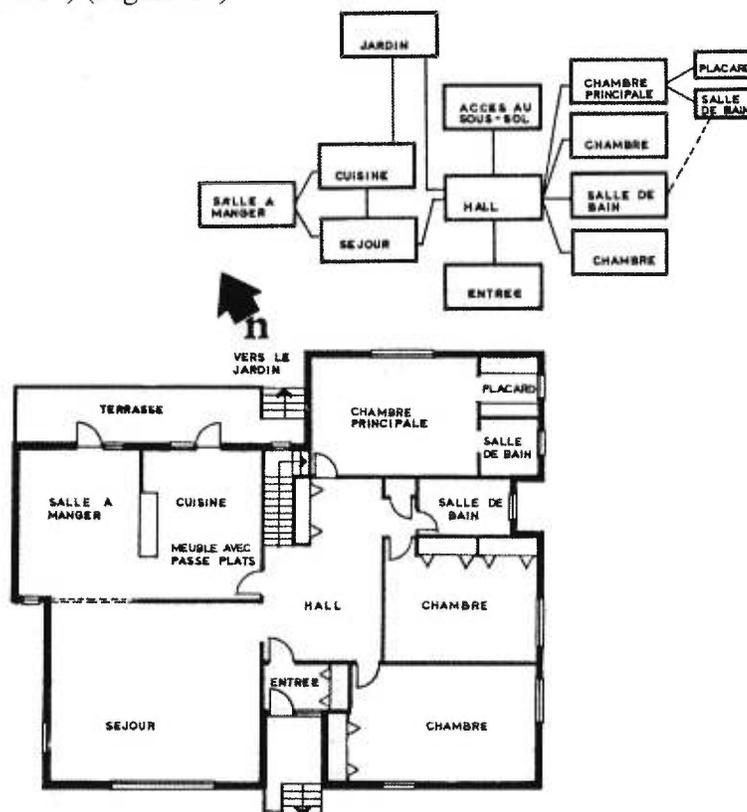


Figure 14. Programmation des pièces d'une maison

Cet «idéal» méthodologique est depuis les années soixante-dix, la base du discours sur l'architecture dont les notions les plus importantes gravitent autour de projet, de processus et de conception. Ces notions ont créé depuis des approches que parfois je peux qualifier de doctrinales, et qui sont encore largement utilisées par le corps professoral des écoles d'architecture ou dans certaines agences d'architecture. Ce qui ne signifie pas qu'il faut éliminer le «dogme» ou la méthode : il faut regarder ces types de discours pour comprendre comment interposer ou introduire de nouvelles attitudes, de nouvelles alliances.

H. Simon, qui a été un des premiers à explorer les méthodologies de la conception dans le domaine des sciences cognitives, reprend d'une façon pragmatique certaines de ces recherches sur la conception et il apporte une vision nouvelle en proposant une définition inédite du concepteur et des domaines d'application :

«Quiconque imagine quelques dispositions visant à changer une situation existante en une situation préférée, est concepteur. L'activité intellectuelle par laquelle sont produits les artefacts matériels n'est pas fondamentalement différente de celle par laquelle on prescrit un remède à un malade ou par laquelle on imagine un nouveau plan de vente pour une société. Voire même une politique sociale pour un État. La conception, ainsi conçue, est au cœur de toute formation professionnelle. C'est elle qui fait la différence entre sciences et profession. Les écoles d'ingénieurs, comme les écoles d'architecture, de droit, de gestion, de médecine, les écoles normales d'enseignement, toutes sont concernées, au premier chef, par le processus de la conception.» (Simon, 1991, p.74)

Avec ce discours, H. Simon introduisait la nécessité d'aborder une problématique de la conception en changeant la question de «comment sont les choses?» à «comment pourraient/devraient être les choses?» Selon R. Prost (1993), une telle perspective bousculait à l'époque un bon nombre de positions établies, dont la distinction entre le savant et le politique que Max Weber faisait dans son livre publié en 1959. De plus, il portait un point de vue général sur la conception et les «sciences de l'artificiel». À ce propos, J.-P. Chupin nous rappelle que H. Simon entend par artificiel tout ce qui a trait aux productions humaines, à distinguer du reste des productions «naturelles». Et il souligne que si cette nuance peut nous paraître peu significative, elle est pourtant très importante : «L'artificiel et son corrélat procédural, la conception, permettent d'envisager une sorte de tronc commun pour conférer une rigueur scientifique à des disciplines aussi diverses et aux objectifs apparemment aussi disparates que l'ingénierie, la médecine, l'architecture ou la musique». (1998, p. 81) Enfin, selon H. Simon, il y a un nouveau rapport sujet/objet qui permet une distinction entre les méthodologies de la conception et celles propres aux sciences exactes, ce qui a permis aux théoriciens du design de reformuler la problématique méthodologique.

Dans *The structure of Ill Structured Problems* et dans *Style in Design* publiés au début des années soixante-dix, H. Simon souligne cette reformulation problématique en rappelant qu'un des points à vérifier lors de la conception est la bonne définition du

problème. Et il précise qu'un problème, pour être bien défini, doit posséder plusieurs propriétés parmi les suivantes :

- «il existe un critère défini pour tester toute solution proposée, et une procédure automatisable pour l'appliquer ;
- il existe au moins un espace problème dans lequel on peut représenter l'état initial, l'état final (solution), et tous les autres états qui peuvent être atteints ou considérés dans la recherche d'une solution au problème ;
- les changements d'état permis (actions légales) peuvent être représentés dans un espace problème comme des transitions d'un état donné aux états qu'on peut atteindre directement à partir du premier. Mais les actions imaginables, légales ou non, c'est-à-dire toutes les transitions d'un état imaginable à un autre, peuvent aussi y être représentées ;
- toute connaissance sur le problème qui peut être obtenue par le concepteur — *problem solver* —, peut être représentée dans un ou dans plusieurs espaces problèmes ;
- si le problème entraîne des actions sur le monde extérieur, alors, la définition des changements d'état et des effets sur les états de l'application des opérateurs reflète avec toute précision, dans un ou dans plusieurs espaces problème, les lois (lois de la nature) qui gouvernent le monde extérieur ;
- toutes ces conditions sont vérifiées au sens fort que les processus de base postulés entraînent seulement des qualités de calcul réalisable, et que l'information postulée est effectivement disponible aux processus, c'est-à-dire, disponible moyennant une quantité de recherche réalisable.»
(Simon 1973 ; Rivero, 1977, p. III.8-III.9)

Ces propriétés, selon H. Simon, sont difficilement atteintes dans le cas de problèmes du monde réel et il nous dit que les espaces de recherche sont très vastes et que pour cela «les systèmes mécaniques de théorèmes échouent fréquemment dans la recherche d'une démonstration lorsqu'ils sont confrontés à des problèmes difficiles». Et il ajoute que «on dit parfois qu'ils ne pourront réussir que lorsqu'ils seront dotés d'ingéniosité» ; mais finalement l'ingéniosité est une transgression du fait que toute connaissance sur le problème peut être représentée dans un ou plusieurs espaces problème. Pour ce fait même, on se retrouve dans le monde des problèmes mal définis.

Enfin, toujours selon H. Simon, l'architecte se retrouve souvent confronté à des problèmes mal définis par le fait qu'il essaie d'être créatif et de sortir d'une solution standard du problème. (1973) V. Rivero, dans sa présentation sur la conception architecturale, cite un autre théoricien des années soixante-dix, H. Rittel qui, poursuivant les discours de H. Simon, définit tous les problèmes de planification

comme des *wicked problems*, des problèmes malins, vicieux, et il les distingue par une série de propriétés en disant à propos des problèmes vicieux que :

- leur formulation n'est pas définitive ;
- leur règle de terminaison n'existe pas ;
- leur solution n'est pas vraie ou fausse, mais plutôt bonne ou mauvaise ;
- il n'y a pas de test immédiat ou de test définitif de la solution d'un *wicked problem* ;
- leur solution est une opération unique parce qu'on n'a pas d'opportunité d'apprendre par essai erreur ;
- ils n'impliquent pas un ensemble énumérable de solutions potentielles. Ils ne font pas appel à un ensemble bien défini d'opérations permettant de les incorporer au plan ;
- ils sont uniques par essence ;
- ils peuvent être considérés comme la manifestation d'un autre problème ;
- l'existence d'un écart entre ce qui est et ce qui devrait être signalant un *wicked problem* peut être expliquée de nombreuses façons dont le choix détermine la nature de la résolution du problème ;
- et enfin, le concepteur est entièrement responsable des solutions qu'il propose et n'a pas le droit de se tromper. (Rivero, 1977 ; Rittel, 1974)

Vingt ans après V. Rivero, J.-P. Chupin, dans sa recherche sur le *Projet analogique*, reprend les écrits de ces deux théoriciens, H. Simon et H. Rittel, en nous rappelant que certains thèmes de la pensée de Simon ont permis de fonder le débat méthodologique sur des bases plus convaincantes, mais qu'en même temps ce débat posait une autre question sur la conception : le processus de design est-il un ensemble de résolutions de problèmes? Pour contourner cette question, ces auteurs ont répondu en qualifiant les problèmes de conception de problèmes mal définis, pour reprendre la définition d'un autre théoricien, B. Archer qui, dans un article dans *Design Studies* nous dit qu'un problème mal défini est fondamentalement le reflet d'un manque d'information. C'est le manque d'information qui ne permet pas au concepteur de trouver la réponse par un procédé de transformation, ce qui signifie qu'il faut trouver assez d'information pour mieux définir le problème. (Chupin, 1998)

Certaines de ces prises de position peuvent aujourd'hui, presque trente ans après, nous paraître anachroniques. Pourtant ces réflexions sur les pratiques et leurs rapports à la connaissance ont apporté une contribution fondamentale l'ouverture de la recherche architecturale à d'autres domaines aussi variés que l'anthropologie, avec ses réflexions

sur la notion de projet (Boutinet, 1990), et la psychologie et ses recherches sur la cognition-action. À ce propos, l'épistémologue O. Akin (1986), en suivant le courant cognitif et les théories de l'intelligence artificielle, propose un modèle du processus de conception qui cherche à codifier «comment» l'être humain agit en état de résolution de problèmes, en nous rappelant que ces solutions sont généralement définies par l'intermédiaire de l'intuition et de l'expérience. Et R. Prost (1993) nous rappelle aussi que l'émergence et la nature de ces questionnements ont dépassé les limites des disciplines traditionnelles, pour aborder de nouveaux domaines tels la cybernétique, les théories de l'information, et surtout, l'intelligence artificielle.

Il est clair que ces recherches méthodologiques sur le processus de conception allaient s'appuyer sur les théories informatiques et les méthodes de traitement de l'information. Selon B. Trousse (1989), la conception est associée à l'ensemble des activités créatives dans la société et elle devient un objet de recherche scientifique. Il n'est pas surprenant de voir que ces nouveaux objets de recherche et ces notions reformulées créent un espoir dans l'outil informatique en tant que «solutionneur de problèmes bien définis». L'affirmation qui dit que l'ordinateur ne se trompe pas et que c'est nous qui avons mal posé la question est encore pertinente.

Depuis une vingtaine d'années, nous observons une mutation de la pensée non seulement pour «expliquer le monde», mais aussi pour «comprendre les condition de sa transformation». Ce qui nous a permis de mettre en valeur d'autres formes de connaissances, en rendant discutable la séparation entre le savoir et le savoir-faire, entre ceux qui pensent et ceux qui agissent. La conception n'est plus vue comme une maquette, un modèle, mais aussi sous son aspect «procédural». Finalement, cette conscience de l'action, de la procédure, peut permettre de voir l'outil informatique, non comme un partenaire, tel que le prêchaient il y a quelques années les chercheurs et théoriciens, mais comme un fédérateur entre les acteurs du processus de création de l'œuvre architecturale. «Agir en pensant et penser en agissant, telle serait, me semble-t-il, une définition possible des termes du problème de la conception». (Prost, 1993, p. 16)

Dans ce cadre de réflexion, l'architecture, tout en étant «distinctive», n'est pas un domaine à part : dans bien d'autres domaines les mêmes interrogations se posent, tout particulièrement sur le rôle des connaissances dans les pratiques de la conception.

2.3 Le rôle des connaissances

Produire des connaissances en architecture, nous venons de le voir, signifie faire appel à des concepts, théories, méthodes, outils, souvent différents et contradictoires jusqu'à situer le concepteur dans des paradigmes différents selon l'état d'évolution du concept de l'archétype architectural. Ce sont ces contradictions, entre contrôle et incertitude, qui définissent le travail du concepteur en architecture : un travail d'interprétation, de traduction, d'union.

R. Prost rappelle qu'«il s'agit bien d'une acculturation constante des regards que l'on porte sur un domaine engendrant une hybridation et un métissage continus des représentations en vigueur dans un champs d'interrogation donné». (1993, p. 18) Et depuis les années soixante-dix, plusieurs épistémologues et philosophes ont fait nombreuses recherches qui ont permis de comprendre quelques blocages qui se présentent lors du travail pluridisciplinaire, M. Serres et I. Stengers, ou encore L. Cohen et F. Chaslin. À ce propos, dans un article sur *La conception architecturale confrontée à la turbulence de la pensée contemporaine*, R. Prost note que:

«En architecture deux ouvrages de M. Serres et I. Stengers s'y rapportent spécifiquement sans toutefois s'attacher à la conception proprement dite : P. Chevrère, *L'architecture sous influence, 1920-1980*, Paris, Ed. Capitales, 1982; C. Girard, *Architecture et concepts nomades*, Bruxelles, Mardaga, 1986. Il faut mentionner les deux réflexions suivantes : J.L. Cohen, «La coupure entre architectes et intellectuels», in *In Extensio* (Paris), 1984 ; F. Chaslin, «Le désir des Arts, manifestation contemporaine de la crise d'identité de l'architecture», in *Cahiers du Musée d'Art Moderne* (Paris), 1992.» (Prost, 1993, p. 18)

Travailler «avec» les connaissances, dans la pratique de la conception en architecture, signifie viser la production de connaissances sur la conception architecturale proprement dite et la production de bâtiments, le processus et le produit. Selon R. Prost, entre les années soixante et quatre-vingts, il s'est passé quelque chose dans les prises de position et attitudes des architectes face à la conception en particulier en ce qui a trait à la référence «mémoire» et au dialogue que les œuvres instaurent avec l'histoire, la ville. (1993) Pour illustrer la manière dont cette référence est interprétée et pour expliquer ce «quelque chose», R. Prost présente des exemples pour différencier

«comment doit-on concevoir?» de «comment peut-on décrire le processus de conception?».

Dans le premier exemple, il s'agit d'un texte de A. Grumbach, paru en 1992 dans *Architecture d'aujourd'hui*, qui nous rappelle que nous ne sommes plus dans une situation où nous observons comment la conception s'opère, mais dans la définition d'un choix épistémique sur la façon dont «doit» s'opérer la conception. Et dans ce cas, il présente le tout sous forme de contexte, le contextualisme. Ce type de discours montre que les connaissances ne sont pas un travail d'induction du concepteur, résultat d'une pratique de projet, mais qu'elles se situent plutôt dans le «contexte» des pratiques sociales. Ce qui me permet de souligner que «comment cela se passe» en conception réfère au contexte de l'action observée, et que «comment cela doit se passer» réfère à un dogme, évidemment lié à une époque ou à une école de pensée.

Dans le deuxième exemple, R. Prost présente un texte de B. Tschumi publié en 1987, dans *Disjunctions*, mettant en évidence le cœur du travail de conception, la recherche du concept opératoire et le travail sur une façon de faire pour concevoir. «Le concepteur cherche ici les conditions et les modes opératoires qui assureront le passage des mots vers les choses, le dialogue entre les intentions et les formes/les espaces». (Prost, p. 22) Dans ce cas, les connaissances qui ont permis d'avoir une nouvelle approche sur l'architecture modifient le discours d'interprétation de l'architecture et aussi celui prescriptif relatif au projet.

R. Prost nous dit qu'on pourrait donner d'autres exemples à travers des discours sur les choix de la forme, du pourquoi constructif ou encore des choix plastiques en architecture et, dans la même veine par laquelle J.P. Chupin nous présentait l'architecture du «clair et de l'obscur», il nous dit que ces choix auront une justification par les intentions, les normes, les conventions. Suivant le point de vue que l'on adopte, le travail des connaissances sur le concepteur ou réciproquement, ces choix peuvent se présenter sous de multiples formes. R. Prost en catalogue quelques unes :

- construire une vision du monde, un regard sur l'époque et la société qui nous entoure ;
- apporter des éléments de fécondation/interprétation d'un projet spécifique ;
- offrir des modes opératoires pour inscrire des intentions/usages dans des formes/espaces et en permettre une représentation/figuration ;

- offrir des modes opératoires pour concrétiser les représentations d'un projet (systèmes constructifs par exemple) ;
- fournir des références pour permettre la validation des résultats de conception. (1993, p. 22)

Cette liste est naturellement non exhaustive, mais elle permet de montrer comment les connaissances jouent un rôle à des niveaux différents et que ces niveaux dépendent de l'époque et du contexte.

Ces connaissances sont celles du concepteur, de l'architecte ; si nous pensons que les connaissances peuvent avoir un rôle de transformation des pratiques de conception, nous devons, comme le souligne R. Prost, faire face à un niveau différent de généralité et de complexité. Un niveau des connaissances des acteurs et des actions posées par les acteurs qui identifie certains blocages ou obstacles dans le processus de conception parmi lesquels :

- le discours analytique ;
- le phasage chronologique ;
- la pensée causale de l'œuvre ;
- la pensée causale du processus de conception ;
- le créationnisme.

- Le discours analytique en architecture est nécessaire et il permet d'avoir un regard sur les points de vue des différents champs théoriques tout comme il permet de voir l'objet sous plusieurs points de vue. Mais pour qu'il ait une utilité, ce discours doit passer de l'état descriptif à celui de l'action. Le concepteur doit chercher comment ces connaissances peuvent s'insérer dans le processus de conception et quelles connaissances sont pertinentes, tout en tenant compte des autres acteurs dans ce processus.

- Le phasage chronologique est celui par lequel on représente le processus de conception par l'esprit du travail fait en temps subséquents : un travail d'analyse, suivi par un travail de synthèse et ainsi de suite. Cette chaîne ne peut pas être représentée d'une façon linéaire pour opérer. Elle doit avoir une approche itérative, par exemple en spirale comme l'a souligné T. Tidafi (1996) en présentant la conception basée sur un processus plutôt que sur une linéarité, pendant la communication entre acteurs.

- La pensée causale de l'œuvre est basée sur le concept de parti architectural. R. Prost nous rappelle que si nous rejetons les théories qui affirment que la forme suit la fonction, nous devrions réfléchir sur l'expression «l'œuvre suit le concept». Il suggère plutôt de nous situer dans un état cybernétique de double lien pour permettre les ajustements et l'autonomie des termes. De cette façon, le processus ne se réduit pas à une concentration des savoirs pour «obtenir» des savoir-faire mais résulte d'une interaction entre savoirs et savoir-faire.

- La pensée causale du processus de conception est basée sur le fait que pendant longtemps la connaissance technique à été considérée comme le fondement de l'action. Elle se rapporte aux relations connaissance/action des sciences appliquées et à la conception linéaire du travail de la connaissance dans le processus de conception. «Nous ne sommes plus confrontés à une conception causale de l'œuvre comme avec la relation concept/œuvre, mais à une conception causale de la procédure d'engendrement de l'œuvre, du concevoir et du faire». (1993, p. 25)

- Le créationnisme part du concept que la création est une boîte noire et que tout peut arriver. Il n'y a pas une méthode *a priori*, il y a création. C'est ce que J.P. Chupin définissait comme la «conception de l'obscur». Nous sommes intéressés au travail des connaissances dans le processus de conception et dans ce cas à toutes les formes et types de connaissances et sans aucune hiérarchie. Souvent nous sommes plus proches de la création artistique.

Ces quelques exemples d'attitudes face à la pratique de la conception architecturale que R. Prost a ressortis dans son investigation posent pour notre recherche une double question. Quelles sont en architecture et pour l'architecte les difficultés à travailler en faisant appel aux connaissances dans d'autres domaines? L'informatique tout en étant un domaine en soi, peut-elle s'insérer dans cette problématique sur la conception en architecture?

Nous savons que dans le processus de conception, toutes les connaissances ne travaillent pas de la même manière, certaines forment le projet, d'autres forment l'abstrait du projet ; les unes étant des opérateurs matériels comme les dimensions des sièges d'un théâtre, les autres des opérateurs immatériels comme la visibilité dans le même théâtre. Souvent, ces opérateurs «immatériels» ont été rejetés, parce que non

opératoires, et aussi par le choix d'une approche souvent utilitariste. Pourtant, ces connaissances constituent l'essence même du processus de conception et la question que nous devons nous poser à ce stade de la recherche est la suivante : pouvons-nous trouver ou re-trouver une complexité qui englobe ces opérateurs et comment y arriverons-nous?

Une réponse à cette question est aussi une réponse aux souhaits que B. Zevi exprimait déjà en 1957, dans son livre *Apprendre à voir l'architecture* :

«Nous assistons à une altération profonde de la compréhension des rapports de l'art avec la vie. Aristote affirmait qu'on ne peut pas écrire un drame sur les hommes communs et qu'il faut concevoir des sujets «héroïques». Le monde moderne, qui expose le bilan d'un siècle de scission entre la vie et la culture, d'un siècle d'architecture conçue comme pièce de musée, proclame exactement le contraire, pousse les architectes et les critiques de l'architecture à leurs responsabilités sociales. Annonce l'imminente destruction de toute position culturelle qui serait inutile, de toute activité artistique qui resterait isolée de la montée sociale pour une vie meilleure.

Une critique moderne, vivante, socialement et intellectuellement utile, sans préjugés, servira ainsi, non seulement à préparer à la jouissance esthétique des œuvres historiques, mais aussi et surtout à poser le problème de l'ambiance sociale dans laquelle nous vivons, des espaces citadins et architectoniques dans lesquels s'étend la plus grande partie de notre journée, afin que nous les reconnaissons, que nous apprenions à les voir

Une histoire moderne, organique, de l'architecture, ne s'adressera pas seulement à notre sens artistique et intellectuel, pas seulement à nos connaissances culturelles, pas seulement à notre affectivité. Elle parlera à l'homme, intégralement homme. Alors la grande majorité d'entre nous verra tomber le rideau des préjugés qui confine la culture architectonique à un secteur moisi, académique et faux.» (Zevi, 1959, pp. 133-134)

Il devient donc important de comprendre comment se traduit la conception en architecture, comment la production matérielle de l'idée introduit des concepts comme la normalisation du projet et enfin, quel rôle joue l'architecte lors du processus de conception et de création de l'œuvre architecturale.

Chapitre 3 Le processus de conception et le rôle de l'architecte

Nous avons souvent vu que conception signifie donner forme, former, et en architecture, c'est l'action par laquelle les bâtiments sont formés. La forme est le but du processus architectural, et son expression est la faculté de comprendre le rapport entre les choses, les idées et les objets auxquels elle se rapporte. Elle est une création ou encore une invention.

La chose la plus facile et en même temps la plus difficile à faire lors de l'analyse d'un sujet est de passer par sa définition. Le définir signifie le comprendre et une fois compris nous pouvons le redéfinir, le tester, l'invalider. Ce qui n'est pas sans rappeler les écrits de K. Popper : «le critère de la scientificité d'une théorie réside dans la possibilité de l'invalider, de la réfuter ou encore de la tester» : «réfutation» voilà le maître mot, voilà le point nodal de la théorie popperienne de la découverte scientifique». (Beaudoin, 1989, p. 37)

V. Rivero, en parlant de conception, nous dit que «sans chercher à développer tout le contenu sémantique de ce mot il semble qu'il s'agisse d'un problème de genèse» (Rivero, 1977, p. 1). Il nous explique que du point de vue physiologique, la conception est l'action par laquelle les animaux sont formés dans le sein de la mère et que former signifie donner forme. Il est donc facile de faire un lien avec l'architecture, où la forme est le but du processus architectural et d'une façon «causale», on serait porté à dire que toute conception est de nature physiologique. En continuant dans la même veine, nous pouvons aussi dire qu'en philosophie, conception est la capacité de l'être de comprendre les choses et de savoir faire des rapports entre des idées et les objets auxquels elles se rapportent. Conception signifie donc création.

Si nous continuons le même raisonnement, nous pouvons ajouter que la conception est de la compréhension, de l'analyse, de la décomposition et de la composition : «La tâche la plus importante du concepteur est de préciser les objectifs souvent flous et ambigus, définis par le client ou par les spécialistes d'autres domaines, satisfaire à ces objectifs et ainsi identifier le dessein fondamental d'un système». (Rivero, 1977, p. 32)

3.1 Le processus de conception et sa traduction matérielle

Le processus de conception est un processus de création, dans lequel l'architecte crée des rapports, des relations, une structure logique des données. Nous pouvons aussi dire que la conception est une idée qui met en rapport intellect et production matérielle. (Ph. Boudon, 1994)

B. Zevi nous a déjà fait remarquer que pour la production matérielle, l'architecte utilise une méthode de travail appelée représentative. Plusieurs chercheurs voient dans la représentation une traduction de l'idée. À ce propos, H.-P. Bergeron nous dit que «traduire est difficile lorsqu'il s'agit de langues appartenant à un même système de pensée, composées de mots exprimant des concepts ; cette tâche devient impossible dans le langage des beaux-arts où les signes n'ont de sens que par leur place, sont créés pour chaque cas particulier, deviennent universels par les rapports qu'ils ont entre eux. En ce domaine de traduction il faut se contenter d'analogies et il est absolument requis de posséder de quelque façon à la fois la discipline intuitive de l'art pour être en mesure de faire l'adaptation d'un système de pensée à un autre». (1968, p. 8)

Ph. Boudon et F. Pousin nous proposent d'utiliser plutôt le «terme de figuration, à la place de représentation, parce que ce terme désigne à la fois l'acte de figurer et son résultat : la figure produite». (1988) Ce qui signifie qu'étudier les méthodes de figuration de l'architecte ne se limite pas seulement à étudier comment les figures et les dessins sont produits, mais aussi à étudier leur formation. Je veux garder cette approche parce qu'elle se situe dans la continuité de notre discours voulant que l'informatique soit un concept fédératif de plusieurs disciplines.

J'ai dit que l'architecte fait un croquis pour communiquer avec un client. Et ce croquis est un rapport entre un signe, un concept, et la réalité des choses. Pour comprendre comment ce croquis pourra être le début d'une figuration que les architectes pourront adopter comme lien dialectique avec les autres phases du projet, nous devons faire une analyse sémiotique de l'architecture. À ce propos, F. Pousin isole quatre points de vue théoriques qui apportent des éclairages complémentaires sur la nature et la fonction des figures produites par l'architecte pendant le travail de conception :

- la relation entre l'architecte et son dessin ;
- les signes et leurs fonctions ;
- le tracé et ses règles ;
- et enfin le mode de signification d'une figure.

Par ces points de vue théoriques, F. Pousin propose un modèle d'intelligibilité d'une activité qu'il définit complexe et polymorphe : la figuration graphique. Et il ajoute que «avec l'apparition de l'outil informatique, la figuration n'en continue pas moins à jouer un rôle de tout premier plan. La mise en image du projet représente une phase clé des logiciels de CAO appliqués à l'architecture. Pour ces logiciels, les figures produites par la machine ont souvent une fonction de proposition et se présentent comme un support pour le raisonnement. En cela, l'ordinateur confirme le lien essentiel qui existe entre figuration et conception». (1988, pp. 5-6) Ce qui signifie que comprendre les méthodes de figuration est pour l'architecte, qui utilise le dessin comme moyen d'expression, partie intégrante du processus de conception indépendamment de l'outil.

Le processus de création de l'objet architectural utilise le dessin pour la production de figures d'une façon telle que ces figures dépassent l'aspect graphique tout en y étant liées. Pour cela le concepteur choisit un mode de production particulier selon le moment et il en utilise plusieurs tout au long de l'élaboration du projet. Le dessin est alors un mode de simulation et il est le support aux choix faits pendant les phases de participation des acteurs du processus. Déjà en 1974, lors des grands débats sur le *design methods*, H. Rittel présentait une méthode de conception qu'il appelle de deuxième génération, à la suite de ses premières études sur les types de problèmes à résoudre en conception, qu'il nomme des *wicked problems*, c'est-à-dire des problèmes malins, malicieux, cette méthode de conception était basée sur :

- «la participation : puisque la compétence ne réside pas seulement chez le professionnel, mais aussi chez tous ceux que le problème de conception ou de planification affecte ;
- l'argumentation : puisque la conception doit être un processus dialectique au cours duquel un ensemble de questions seront discutées et décidées ;
- la conscience de l'abstraction : puisque n'importe quelle question peut être considérée comme une manifestation d'une autre plus fondamentale ;
- la transparence de l'argumentation ;
- l'objectivation : pour rendre les processus compréhensibles comme moyen d'oublier moins, et de stimuler le doute ;
- la soumission : puisque le client, qui délègue le jugement à un professionnel, doit être capable de maintenir le contrôle sur le jugement délégué ;

- l'entente : puisque la solution ne doit pas être l'implémentation de la proposition du concepteur, mais plutôt le résultat de la coopération entre le client et le concepteur.» (Rivero, 1977, p. III.12)

Le dessin alors, comme mode de simulation, permet la participation des acteurs dans les phases de conception, selon leur degré de compréhension de la figuration présentée. Il est pour cela important de situer le concepteur et les acteurs par rapport à l'espace architectural. Est-ce que le dessin peut «contenir» les savoirs et les savoir-faire? Est-ce qu'une première esquisse qui représente l'extériorité de l'objet avec son environnement, est encore un objet à construire et qu'à cause de cela, il n'intéresse pas encore certains acteurs, par exemple l'ingénieur en structure? Ou est-ce que déjà à ce stade le dessin «comprend» une forme que l'architecte pense réalisable et où tous les acteurs du processus de création peuvent intervenir? (Figure 15)

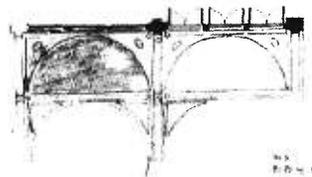
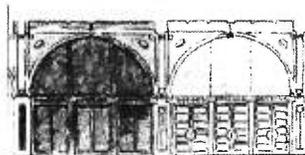
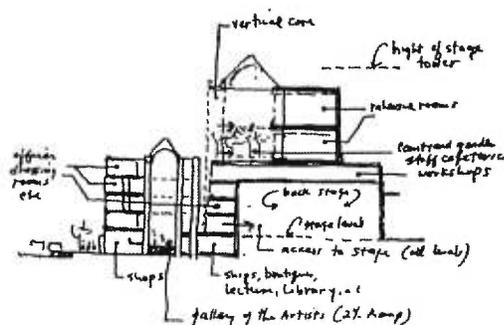
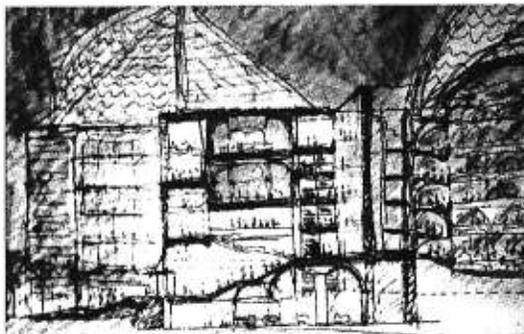


Figure 15. Esquisses de la maison de l'opéra de Toronto (M. Safdie, architecte, Somerville, É.-U.)

Finalement, dans cette première phase du processus de création, la tâche du concepteur est de préciser les objectifs, souvent flous et ambigus, définis avec les acteurs du projet, pour en identifier un dessein. Ce dessein représente des rapports, des relations, une structure logique des données qui ne sont au début que des propriétés d'ensembles ou sous-ensembles. Enfin, la conception peut-être considérée comme un processus créatif et collectif qui anticipe l'enregistrement des concepts et des expériences. «L'architecte, ou un artisan, ou un designer, ne peut pas concevoir en employant uniquement des formules, comme le peut un ingénieur, ni aussi librement qu'un peintre, poète ou musicien». (Rivero, 1977, p. 27)

Architecture et conception sont deux choses qui vont de pair. V. Rivero, qui dans sa thèse a analysé les modes de conception des architectes, constate que depuis toujours l'architecte a employé des démarches implicites, dans le sens que l'acte de création se produisait dans la tête de l'architecte et qu'il n'avait pas à le justifier. Mais qu'avec la complexification des problèmes architecturaux il n'est plus possible d'appréhender toutes les données relatives aux programmes architecturaux et il poursuit sa réflexion en disant :

«Nous voici donc confrontés à des projets dans lesquels chacun des sous-systèmes est à son tour devenu si complexe qu'il nous faut le décomposer.

Mais maintenant on ne dispose plus d'un guide naturel pour effectuer ce découpage et il est nécessaire de formaliser le problème pour l'analyser à fond et trouver sa structure.

L'architecte doit alors utiliser des outils d'aide à la conception pour saisir ce qui, compte tenu de la taille, n'est plus évident. Il devra élaborer une abstraction de la réalité architecturale en ce qui concerne sa problématique.» (1977, p. I.3-I.4)

Pour définir cette problématique je dois avant tout pouvoir cerner les tâches de l'architecte. Plusieurs architectes et ordres professionnels se sont penchés sur la définition des tâches de l'architecte et cela pour définir un cadre d'intervention dans cette profession. D'après H. Rittel les tâches peuvent être ainsi présentées :

- l'architecte est le coordinateur des projets de construction. Il intègre la connaissance de plusieurs disciplines dans une solution réconciliant des exigences et des préférences conflictuelles ;
- l'architecte est un spécialiste du dessin et de l'élaboration de la construction de bâtiment et des systèmes composants ;
- l'architecte est un ingénieur de l'environnement qui sait comment fournir les conditions contrôlées désirées des environnements humains ;
- l'architecte est et sera principalement un artiste, une sorte de sculpteur du vide, qui emploie des bâtiments comme moyen d'expression. Il crée des images spatiales basées sur sa connaissance des valeurs architecturales intrinsèques. (Rittel, 1974)

V. Rivero qui a repris ces définitions ajoute qu'on pourrait continuer avec d'autres variantes et il souligne tout particulièrement que l'architecte est celui qui a la tâche de «faire le monde plus beau» tout en étant un visionnaire, pour les images de demain, un réaliste social, pour refléter l'état de la société en termes de bâtiments et un mysticiste

de la forme. Je pourrais ajouter à cette liste, non complète ni restrictive, d'autres tâches, mais le but n'est pas tant de voir la quantité de tâches, ni de les définir dans une norme, comme pourrait être le souhait des ordres professionnels, que de saisir la complexité du problème de conception et de tenter de savoir comment ces problèmes qui ont été, depuis la Renaissance, traités en systèmes et sous-systèmes, sont arrivés à un point où la décomposition n'amène plus à une résolution de problèmes, mais plutôt à une redondance, duplication et autre.

C. Parisel, en présentant une proposition d'organisation des fichiers et des données pour l'Université de Montréal, nous rappelle la nature et les limites de la description actuelle des bâtiments en nous disant que «le développement et la mise au point, à la Renaissance, de la géométrie projective a permis de représenter le bâtiment par un modèle iconique complet et a rendu possible la séparation de la conception d'avec la réalisation en assurant un transfert d'informations entre deux rôles par le biais de ce modèle». (1990, p. 4) En poursuivant dans cette analyse, C. Parisel nous dit que la science graphique qui en résulte a permis la codification d'un objet tridimensionnel par des projections de cet objet que nous appelons plans, coupes, élévations et perspectives qui en définissent ses caractéristiques géométriques et par le développement et la création de symboles tels les hachures et les cotes pour en préciser des caractéristiques telles les propriétés des matériaux ou leur dimensions et leur assemblage.

Par la suite dans les dernières décennies, une nouvelle approche par des modèles mathématiques, par exemple, pour l'analyse du comportement structural ou la consommation énergétique, a vu le jour. Ces instruments nécessitent un traitement de l'information qui est consigné dans les plans et devis pour permettre une «traduction» de ces modèles sous un format manipulable. Et finalement, nous nous retrouvons avec une description du bâtiment par des outils différents, selon les intentions de traitement, en gardant quand même le tout lié d'une façon implicite, puisqu'il s'agit de la description du même objet. L'analyse de toutes ces données nécessaires pour modéliser le bâtiment nous amène à réévaluer les méthodes de description du bâtiment pour rebâtir le modèle descriptif actuel. Enfin, C. Parisel identifie quatre critères principaux qui apparaissent comme des indices pour redéfinir l'information à traiter pour la modélisation du bâtiment :

- la redondance (vs unicité) ; dans ce cas il s'agit des détails de construction souvent répétés lors de leur représentation par les projections orthogonales (Figure 16) ou encore par la répétition sous diverses formes du même objet ;

- l'ambiguïté (indefinis vs défini); un objet peut être interprété différemment selon sa description et il y a toujours un doute dans son interprétation (Figure 16) ;
- la cohérence (vs incohérence) ; dans ce cas un changement dans une représentation d'un objet n'est pas toujours respecté dans les autres représentations (Figure 16) ;
- l'intégrité (vs l'inconsistance) ; ce qui signifie que les relations logiques entre les diverses informations ne sont pas toujours explicites et maintenues lors d'un changement des caractéristiques d'un objet. (Parisel, 1990)

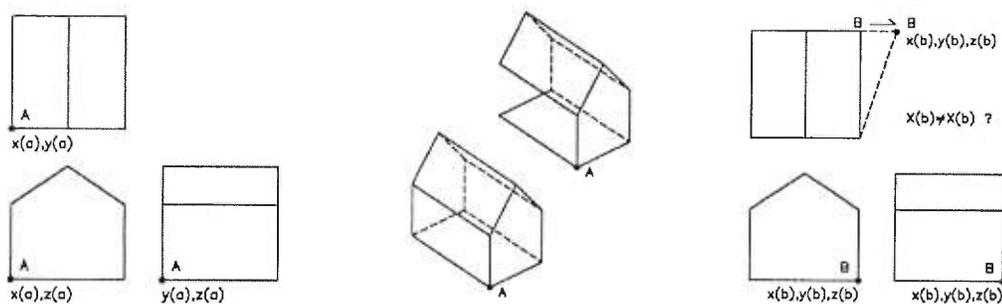


Figure 16. Les projections orthogonales : exemples de redondance (à gauche) d'ambiguïté (au centre), et d'incohérence (à droite) (C. Parisel, 1990)

Cette complexité du problème de conception et de son traitement n'est pas seulement donnée par les méthodes et les outils de représentation. Selon P. Boudon, le travail de l'architecte ne relève pas du type déterminisme de contraintes : «La conception d'un édifice est portée par des choix, des intentions, des décisions que permet, ou auxquelles renvoie, l'idée». (1994, p. 3) En développant le concept d'idée, Ph. Boudon nous dit que l'«idée» de l'architecte ne doit pas se comprendre au singulier. Elle est un ensemble de convictions, de croyances, ou encore d'opinions d'influences diverses, auxquelles le concepteur est attentif, en recherche d'inspiration et pour mettre en rapport pensée et production matérielle. Ce qui signifie que la production d'un bâtiment ou d'un artefact est un travail intellectuel et non seulement une réalisation ou un exploit technique. Ou, comme le soulignait K. Marx «Ce qui sépare l'architecte le plus incompetent de l'abeille la plus parfaite, c'est que l'architecte a d'abord édifié une cellule dans sa tête, avant de la construire dans la ruche». (Le Capital, t.1, p. 788, Le Moigne, 1995, p. 86)

Ce travail intellectuel, son explicitation, et sa figuration, ont, depuis toujours, soulevé des controverses quant au rapport entre l'esprit et la réalité sensible ou, comme le dit P. Boudon, entre la connaissance intelligible et la connaissance sensible, ou entre les deux modalités de création :

«[...]l'imitation qui reproduit ce qui est vu, et l'imagination qui (re)produit ce qui n'est pas vu.

Mais comme l'a montré E. Panofsky (1924) dans une étude qui retrace l'histoire de la transformation du concept d'idée, l'idée n'est pas demeurée dans la sphère de la métaphysique et ramenée au rang de concept par les stoïciens, elle a pris des acceptations diverses au cours de l'Histoire. Et c'est le problème de la création, de l'inspiration, du rapport au visible que ce concept permet de penser.

Un des thèmes fondamentaux concernant le rapport de l'idée à l'œuvre est celui de son rôle : génère-t-elle l'œuvre - ce à partir de quoi travaille tout créateur - ou est-elle générée par ce travail même?» (1994, p. 40)

Cette problématique trouve, selon les époques et les moments historiques des réponses parfois porteuses de nouvelles approches ou de changements discutables. Par exemple, lors de la description du Centre Air Canada, le nouveau stade polyvalent appelé : *le théâtre du sport et du spectacle*, l'auteur nous dit que l'architecture de cet édifice s'est pliée aux impératifs commerciaux. «Les affaires ont dicté la conception», résume Tom Anselmi, ingénieur responsable de l'ensemble du projet de construction. Et l'architecte du complexe, Wayne Garret, confirme avoir répondu aux contraintes commerciales de diversification de la gamme de produits tout en soignant l'atmosphère du lieu : «Nous avons deux objectifs pour cet édifice, d'abord, maximiser le potentiel de recettes pour le groupe propriétaire par la diversité du produit siège et par la galerie commerciale. Ensuite, essayer de rendre l'édifice aussi intimiste que possible». (Rouyer, 1999)

Pour poursuivre notre quête sur la notion d'idée et de matière, il faut souligner qu'il n'est, de toute façon, pas étranger à l'histoire de la pensée occidentale. Depuis Aristote, pour qui idée et matière étaient fortement attachées, en passant par Thomas d'Aquin pour qui l'idée était le modèle spirituel, jusqu'aux théories néo-classiques, dans lesquelles l'idée était l'idéal à attendre. (Ph. Boudon et al., 1994) L'ensemble de toutes ces valeurs sémantiques liées à l'idée nous font prendre conscience que la conception et l'architecture ne donnent pas seulement un ensemble d'objets construits, mais aussi un

ensemble de modèles qui, par leur expression du savoir et du savoir-faire, lui permettent d'inventer et d'innover.

Le concepteur exprime cette invention, cette idée, par des mots et des images. Il les soumet ensuite aux différents acteurs du projet pour commencer à matérialiser l'idée. Ce travail de conception n'est pas encore celui de la matérialisation du bâtiment. Elle est pour l'instant un état non encore défini d'un embryon qui représente des proportions, des propriétés, des significations. (Figure 17)

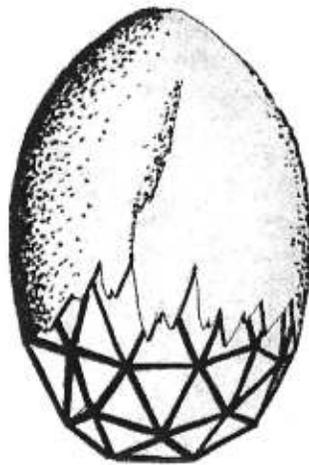


Figure 17. L'embryon en architecture (*Transmedia junction : l'architecture alternative aux États-Unis*, G. De Paoli et al., 1975)

Pourtant, quand on parle de conception en architecture on parle souvent plus facilement de matérialisation de l'idée, par ses détails et sa précision géométrique ; préoccupation centrale depuis l'âge industriel où le processus de design du bâtiment est souvent comparé à un système de production et à une organisation industrielle, confrontée au problème d'une continuelle restructuration conceptuelle du bâtiment. (Tombesi, 1999)

À cet effet, P. Tombesi, dans un article sur le partage des responsabilités de design dans le processus de construction du bâtiment, rappelle que ce processus est comparable à un système de production industrielle et qu'il faut observer comment les théories sur l'organisation industrielle ont transformé l'organisation du travail. Et il souligne que l'architecture demande une complète restructuration conceptuelle du bâtiment et une reconsidération de la notion de la profession. (1999, p. 134)

3.2 L'architecte et la dualité entre poïétique et technique

Pour mieux comprendre les causes qui ont amené à «voir» l'architecture par sa technique d'exécution, je me suis interrogé sur l'évolution du rôle de l'architecte depuis trois mille ans d'histoire de la culture occidentale, et sur le dessin comme outil de travail. Ce dessein qui a amené l'architecte au dessin et aux choix «réducteurs» du parti architectural et des normes de conduite. La simple signification de prendre un parti veut dire, éliminer certains choix, simplifier le projet et réduire cette complexité du bâtiment qui en fait sa qualité, où le dessin est l'outil de communication : un système géométrique, souvent géométral et constructif qui permet la réalisation du bâtiment, sans en être l'outil de création.

Il n'y a pas de recherche sur la conception en architecture qui ne se pose pas, à un certain moment, la question sur les rôles des acteurs du projet de construction et tout particulièrement sur l'évolution des rôles de l'architecte par rapport à celui de l'ingénieur. P. Poitié nous rappelle que «tout se passe comme si les architectes depuis la Renaissance avaient le plus grand mal à exprimer la «vérité technique» et se condamnaient aux appareillages feints, à la dissimulation des structures». (1987, p. 7) Mais pourquoi ingénieurs et architectes ont-ils souvent fait partie d'un débat d'antagonistes? Sous quelle vision *l'art de bâtir* de Vitruve comprenait-il les sciences de la construction pour exprimer l'équilibre solidité-utilité-beauté?

P. Caye, dans un article sur *l'architecture et la question de la technique*, nous rappelle que le nom *Architectura* est le vieux nom romain pour définir la technique : «une science composée de nombreuses disciplines scientifiques et de savoirs techniques de tous ordres, par le jugement de laquelle toutes œuvres réalisées par les autres arts se trouvent démontrées et certifiées conformes». (Vitruve, trad. M. Pollion, 1990, p. 4) Et il poursuit en disant que «Vitruve fait de l'architecture non seulement le savoir par excellence de la fabrique¹, mais mieux encore la raison critique de tous les autres arts commis sur le chantier». (1996, p. 51) Ce qui signifie que l'Architecture de Vitruve

¹ F. Milizia, (1827), définit l'architecture comme l'art de «fabriquer» en général ; dans *Principii di Architettura civile in O.C.*, Bologna, p.17

donne à la poïétique le sens de faire et de fabriquer par la supervision de toutes les disciplines jugées nécessaires pour réaliser une œuvre solide, utile et belle. Et il ajoute :

«Antoine Picon, dans son ouvrage consacré aux architectes et aux ingénieurs du Siècle des Lumières¹, a montré comment tout au long du XVIII^e siècle la *mathesis universalis*, ou «savoir universel» de l'ingénieur, fondée sur la mathématisation galiléenne du monde, s'était substituée, non seulement comme principe d'aménagement et de structuration du territoire mais aussi comme paradigme technique de la fabrique, à la culture encyclopédique (ce que les anciens appelaient la *païeda*) de l'architecte, réduisant ainsi le grand Art, au sens nietzschéen du terme, qu'était l'architecture humaniste et classique au simple rang d'un des beaux-arts.» (1996, p. 51)

Je peux dire que, au fil des temps, nous assistons à une dualité où l'architecte est parfois superflu, pendant que l'ingénieur est souvent nécessaire. Nous laissons à l'architecte les goûts, les couleurs, pendant que la structure, les matériaux et l'ingénierie déplacent le débat scientifique sur la construction. (Queysanne, 1987) Les efforts d'architectes comme Viollet-le-Duc, qui prêche la raison pour comprendre un édifice où la fonction la forme et la construction s'entremêlent, ne sont pas suivis et les Écoles des Beaux-arts se transforment en Écoles des Ponts et chaussées (Il est plus important de s'appeler *pontifex*, faiseur de ponts que *artifex*, faiseur d'artifices). Présenter l'histoire de cette dualité est une condition à une proposition de «réunification».

Comme le souligne A. Coste dans une analyse sur les architectes versus les ingénieurs, nous nous retrouvons peut-être à la fin d'un cycle pour l'ingénieur qui en poussant trop loin son analyse a perdu sa puissance conceptuelle, tel que décrit par E. Fergusson dans un ouvrage publié au MIT de Boston en se référant à des enquêtes menées auprès d'universités et d'écoles d'ingénieurs au États-Unis, en Europe et au Japon. C'est peut-être aussi la fin d'un cycle pour l'architecte pour qui l'arrivée de l'informatique permet de se créer une nouvelle place comme «acteur principal dans le réseau d'échanges d'informations». (Coste, 1997, p. 20) Et probablement nous retrouvons-nous à nouveau comme entre le XVIII^e et le XIX^e siècle où, comme J.P. Épron le souligne dans son article *l'Eclectisme technique* :

«Le problème posé aux architectes est d'occuper dans le processus de construction la place de coordinateur. Leur référence pour justifier ce rôle

¹ Picon, A., (1988), *Architectes et ingénieurs au Siècle des Lumières*, Parenthèses, Marseille

qu'ils revendiquent n'est pas une compétence «scientifique» — qu'ils ne sauraient pas d'ailleurs justifier comme suffisante pour obtenir une autorité indiscutable sur le chantier —, mais le projet lui-même, qu'ils sont explicitement chargés d'établir et de faire exécuter.» (1992, p. 82)

Quel est a été et quel est donc le rôle de l'architecte?

3.2.1 Le rôle de l'architecte dans l'histoire

L'architecte était à l'époque grecque celui qui supervisait et dirigeait les travaux d'architecture sur le chantier. Il était le chef des ouvriers. L'architecte n'était pas nécessairement le créateur ou le maître créateur de l'œuvre. Les prêtres ainsi que les militaires étaient souvent les concepteurs de l'œuvre et non seulement les promoteurs. Certains chercheurs iront jusqu'à dire que ces artisans étaient de véritables organisateurs de chantier sans aucune préoccupation artistique : «Son savoir-faire venait de son expérience et de ses connaissances théoriques qui lui permettaient de formuler une solution architecturale pour un type de projet d'architecture». (Burford, 1972 ; Tidafi, 1996)

Le mot architecte apparaît dans les écrit d'Hérodote qui nous parle des exploits techniques de Eupalinos de Mégare et de Recos de Samos et nous pouvons croire que sémantiquement ce rôle d'architecte était attribué à des personnes ayant réalisé tout particulièrement des exploits techniques. B. Queysanne, dans une étude sur les approches constructives en architecture, associe les capacités d'interprétation technique des idées à l'intelligence et au savoir-faire. Il nous dit que l'architecture au temps des Grecs n'était pas réservée à une corporation étroite, mais à ceux qui savaient faire preuve de *metis* c'est-à-dire d'intelligence et, pour appuyer cette affirmation, il nous rappelle que «les architectes dont nous avons les noms n'étaient pas seulement des architectes : Phidias était aussi sculpteur, Mandrocle de Samos, ingénieur et peintre, Hippodamos de Milet, urbaniste et philosophe, Philon, orateur et ingénieur militaire». (1987, p. 10)

Avec le temps la *metis* perd son importance et Platon, par exemple, la déconsidère en affirmant que l'architecte est comme le sophiste «celui qui sait faire des détours pour atteindre un but». (Queysanne, 1987) Nous assistons aux premières assises de la

pensée occidentale : c'est la mesure précise, exacte qui prend pied et l'architecte n'est qu'un artisan, le faire étant séparé du poétique.

C'est à partir du début des années 200 av. J.-C. que l'on retrouve le mot architecte dans les écrits. «L'architecte était le *pontifex*, le faiseur de ponts, et il appartenait au collège pontifical. Et lors de la construction du premier pont sur le Tibre à Rome, le Pont Sublicius, nous retrouvons la fonction sacrée de l'architecture. Mais pour le reste, à l'époque de la Rome antique, les Romains sont indifférents à l'architecture et beaucoup plus préoccupés d'une forme de *metis* qui exprime les exploits techniques. (Queysanne, 1987) Après la conquête de la Grèce, se tissent des liens et des échanges qui amènent les Romains à une attention du goût architectural et à un souci plus prononcé dans la réalisation des œuvres architecturales. Le collège pontifical commence par avoir un génie militaire, puis un génie civil. À la fin du II^e siècle av. J.-C., apparaît la figure de l'architecte qu'on appelle *architector* et *architecton mechanicus*, figure qui s'apparente plus à celle du géomètre et de l'entrepreneur-promoteur. (Tacite, empereur romain 200, 276 av. J.-C.)

Vitruve, par son traité sur l'architecture, nous montre l'architecture comme un métier complexe où l'architecte doit connaître non seulement le dessin et la géométrie, mais aussi l'histoire, la philosophie et l'astronomie. Selon lui la *poïesis* n'est pas séparé du *techné* : l'architecte est un ingénieur et vice-versa et il doit se préoccuper de la solidité, de l'utilité et de la beauté du bâtiment. Tous ces opérateurs doivent présider à la fabrication du bâtiment.

Le rôle de l'architecte suit de près les paradigmes qui ont guidé la pensée occidentale depuis le début de l'histoire : la séparation de l'esprit, qu'on associe aux sens, aux sentiments du corps qui est matière et technique. Depuis, et dans toutes les civilisations, le nom de l'architecte s'efface pendant quelques temps et réapparaît, avec des fonctions toujours en mutation, mais toujours prises en haute considération. Les rôles de visionnaire et de mystique se mélangent à ceux de technicien, de maître de chantier, de rédacteur des premières normes liées à la construction (un édit en 643 du roi Rothari parle déjà de problèmes de construction et de la construction en bois et du rôle de l'architecte).

Avant la Renaissance l'architecte devient, *mechanicus*, *magister*, maître-maçon pendant qu'on commence à voir apparaître la dualité avec la naissance du rôle de

ingeniator, encignarius et engigneur (Pour Tertullien, 155-222 après J.-C., dans ses textes sur Carthage, les *ingenia* étaient les machines de guerre). Il est intéressant de remarquer que nous assistons, en même temps, aux grands débats sur la spiritualité de l'âme de Thomas d'Aquin (1225-1274), docteur de l'Église catholique, et dont le thème central des pensées est autour d'une harmonie entre la foi et la raison, ou de Maître Eckhart (1260-1327), dont les œuvres furent condamnées par l'Église, et qui fut à l'origine de la tradition conceptuelle reprise par l'idéalisme allemand.

Cette dualité entre *ingeniator*-bâtitseur et *artifex*-maître-d'œuvre se perpétue jusqu'à la deuxième moitié du XVI^e siècle, quand Philibert de l'Orme fait paraître le *Premier tome de l'architecture* où l'on dévoile la science du tracé de l'épure pour la taille des pierres (Figure 18), un début de la stéréotomie et des recherches sur la géométrie projective, et que l'architecte devient le réalisateur du projet par la confection des dessins techniques. (Vagnetti, 1973 ; Queysanne, 1987)

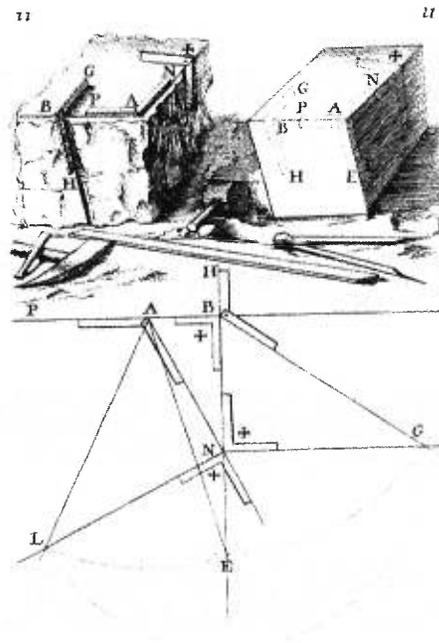


Figure 18. La pratique du trait à preuves de Messieurs Desargues, lyonnais, pour la coupe des pierres en l'architecture, publié par Abraham Bosse, Paris, 1663 (Simonnet, 1987)

La production des épures prend de plus en plus d'importance. Elle accompagne et remplace les perspectives, les trompe-l'œil, ou elle les utilise selon les préceptes d'Alberti. J. Sakarovitch, dans un article sur la *Construction du géométral ou sur comment dessiner l'espace*, nous rappelle que l'architecte est celui qui, capable de concevoir, traduit sous forme graphique un projet de bâtiment, avec une technique que nous appelons couramment «dessins d'architectes» et qui consiste dans une représentation dite en «géométral» permettant aux corps de métiers de comprendre et construire. Pour que le bâtiment soit conforme à la pensée de l'architecte, le dessin doit être rigoureux, avec un langage graphique non ambigu. Ce qui explique, dit l'auteur, pourquoi les perspectives coniques ou cavalières ne sont qu'un complément du géométral. Mais en même temps, Sakarovitch nous rappelle que cette vision de l'architecte, producteur de plans, est relativement moderne. En effet, les premiers dessins où apparaît une articulation entre les vues ne sont pas antérieurs au XIV^e siècle et tout à fait exceptionnels au XV^e. (1997, p. 9)

Enfin, tout en gardant certaines des assises de Vitruve, P. de l'Orme demande à l'architecte d'être un philosophe et un mathématicien et d'acquiescer une précision dans l'épure. Il lui demande d'éviter de tromper les seigneurs (Livre I, chap. X) par le dessin et de ne pas être rhétorique, comme le suggérait Vitruve, mais diligenter pour permettre la bonne compréhension du bâtiment. Et enfin, il introduit la nécessité de modèles et de descriptifs techniques. On sent dans cette attitude une réponse aux techniques de représentation qui viennent de la peinture et que P. de l'Orme considère abusives.

Tidafi, dans ses recherches sur la communication en architecture, fait une analyse exhaustive des prescriptions de Philibert de l'Orme en soulignant que ce fils de maître-maçon :

«considère la façon de réaliser un projet d'architecture en mettant à contribution une tradition médiévale et la culture de son temps, celle de la Renaissance. D'un côté, il tire avantage du savoir développé à la Renaissance en distinguant notamment le travail de formulation de celui de concrétisation pendant un processus de conception (en ayant lu le traité de L.B. Alberti). De l'autre côté, il garde un lien avec le Moyen Âge en héritant et en comprenant l'importance d'une expérience sur un chantier de construction.» (1996, p. 201)

Tout en soulignant que le traité de P. de l'Orme reste un témoignage d'expérience personnelle et qu'il est le résultat d'un exercice à caractère prescriptif qui n'est pas nécessairement l'explication de comment ses contemporains considéraient le projet d'architecture et son processus.

Entre P. de l'Orme et ses deux traités, *Les Nouvelles Inventions pour bien bastir et à petits fraiz* en 1561 et le *Premier Tome de l'architecture* paru en 1567, et J.P. Alberti qui proposa une première méthode de construction «rigoureuse» dans *Della Pittura* en 1435, ont été écrits plusieurs autres textes. Relevons le manuscrit de Piero de la Francesca en 1465, le *De perspectiva pingendi*, qui propose une méthode graphique basée sur les règles dictées par Alberti, les *Carnets* «techniques» de Léonard de Vinci parus en 1500, ainsi que les nouvelles règles du chanoine Jean Pelerin dit le Viator qui publia en 1505 le *De Artificialis Perspectiva* qui est un recueil de gravures mettant en perspective des bâtiments de l'époque. Ces nouvelles règles permettent de construire un plan en perspective et de le graduer en profondeur sans faire appel aux premières techniques d'Alberti. (Comar, 1992) Citons encore A. Dürer qui publie en 1525 dans *Underweysung der Messung* des méthodes «mécaniques» pour dessiner en perspective. C'est à lui que nous devons la technique qui consiste à découper un solide en nombreuses tranches parallèles pour en faciliter la projection des données. (Clagett, 1980) Poursuivons avec S. Serlio qui en 1545 établit les règles générales pour l'architecture, et avec J. Cousin qui reprend les techniques du Viator et publie en 1560 son livre sur la perspective.

Après P. de l'Orme, le débat entre auteurs et théoriciens permet la publication de nombreux traités qui développent tour à tour des théories et produisent des querelles entre l'art et la science : les peintres et les géomètres. (Figure 19) Et cela jusqu'au début du XVII^e quand paraissent, à Paris en 1636, les premières études de G. Desargues. Ces études furent republiées par A. Bosse en 1639 sous le titre de *Exemple de l'une des manières universelles du S.G.D.L.* paru en 1639 par A. Bosse et elles définissent par un théorème les principes de la perspective. (Comar, 1992)

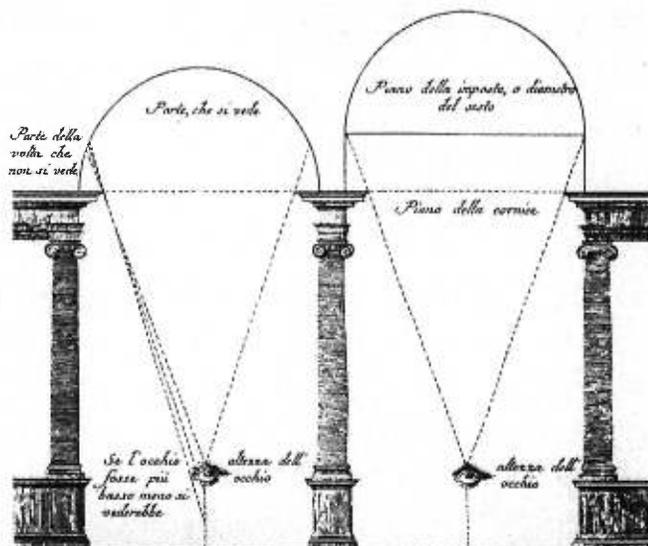


Figure 19. Correction du point de vue perspectif, T. Gallaccini, Trattato sopra gli errori degli architetti, 1625

(Kruft, 1995)

Mentionnons enfin qu'à la fin du XVIII^e siècle G. Monge, avec son texte presque dogmatique sur la géométrie descriptive, application systématique de la perspective parallèle, ainsi que J.V. Poncelet et son traité des propriétés projectives des figures publié en 1822, définissent une méthode nouvelle dans la pratique du dessin. Une méthode qui, encore aujourd'hui, est enrichie par les recherches sur le tracé des ombres pour que ces projections soient compréhensibles par ceux qui les regardent et les perspectives axonométriques héritage de l'École du Bauhaus en Allemagne qui donnent une nouvelle place à l'œil de l'observateur.

Nous sommes loin des textes de Vitruve, où le savoir-faire côtoyait le savoir. L'architecte devient un producteur de dessins qui sont souvent une dénégation du savoir-faire. Ils opèrent comme une image fixe, je dirai sans équivoque et en même temps sans intelligence, un comportement parfois fictif de la matière, comme le dit S. Ferro, en rappelant les principes des tracés formulés depuis le XVI^e : «avant le dessin comme mode de construction, puis le gommage par le revêtement, enfin la fausse pierre pour déguiser». (1987, p. 39) Autrement dit, depuis plusieurs siècles, le dessin insiste sur son rôle de signe (image) et laisse flou son univers sémiotique. Et pour ce qui est du dessin de conception, par le truchement de la représentation iconique, il prend la place du *logos* qu'il devrait seulement annoncer, en substituant un signifiant à la place d'un autre. (Ferro, 1987) (Figure 20)

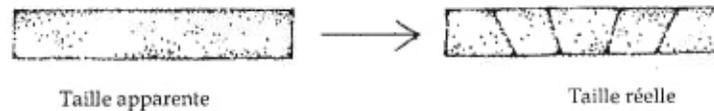


Figure 20. Comportement fictif de la matière, figure représentant un linteau et son appareillage (S. Ferro, 1987)

Deux traités importants de l'histoire de l'architecture sont *L'architecture pratique* de Bullet en 1691 et le *Traité de l'art de bâtir* de Rondelet en 1802. Les deux textes sont des traités de construction parce qu'il s'achèvent sur la description, clé de la pratique de l'architecte et J.-P. Epron (1987) nous dit que dans les deux cas, la description lie le projet à sa réalisation et que c'est le moyen pour l'architecte de saisir le rapport «architecture et technique».

L'architecte s'est déplacé du chantier à la table à dessin, en créant l'illusion de la troisième dimension, sous les incitatifs de G. Monge, qui, nous l'avons vu, trace les règles de la géométrie descriptive, pour permettre une représentation rigoureuse qui évite l'ambiguïté et permet de calculer les formes et les mesures d'un langage universel assurant la communication entre les ingénieurs et les architectes. Ces règles qui, encore aujourd'hui, dictent souvent la compréhension du bâtiment par le truchement des deux dimensions et le rabattement de la troisième. Troisième dimension qui trouve son présent dans les rendus, et les images figuratives que G. Monge, propose d'utiliser avec les effets d'ombre pour la comprendre : un artifice pour mieux comprendre. Le dessin doit être le support pour tout voir.

Ce débat sur la représentation n'est pas clos, au contraire. Avec la présence de l'outil informatique et le développement logiciel, il est encore plus d'actualité et il demande une nouvelle recherche sur la perception de l'image, la représentation graphique et les opérateurs présents pendant les phases du projet architectural. Entreprendre ces recherches permet de mieux saisir la représentation, la fonction de l'image et les qualités que nous attendons de la conception assistée par ordinateur pour comprendre à son tour le rôle de l'architecte dessinateur et/ou gestionnaire du projet et du chantier. Ces débats sur la représentation graphique soulignent enfin comment, dans le temps, le métier d'architecte et la gestion du projet amènent à des structures

organisationnelles tant du côté de la profession que de la production matérielle des épures.

3.2.2 La naissance des corporations professionnelles et la normalisation du projet

À partir de la fin du Moyen Âge, le maître responsable de l'ouvrage et chef des ouvriers voit son rôle se modifier. À partir de la Renaissance, apparaît l'architecte qui centralise et contrôle le dessin et le dessin de l'œuvre. Et lorsque survient la révolution industrielle, l'architecte, tout en gardant la paternité et le contrôle de l'œuvre, s'adjoit des consultants que l'introduction de nouveaux matériaux et une spécialisation technique plus poussée rendent indispensables.

La meilleure façon de comprendre ce dernier rôle est de tracer son histoire à partir du début des associations de métier, comme le souligne W. Mitchell, selon les schémas des Figures 21, 22, 23 et 24 (1977) :

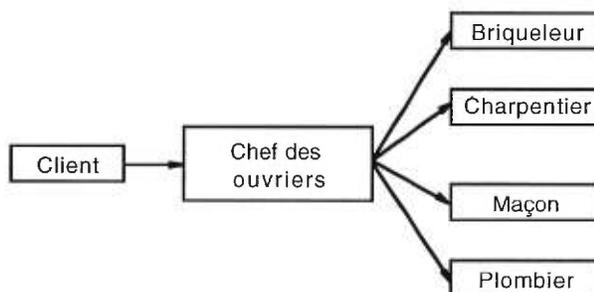


Figure 21. Le *building team* médiéval

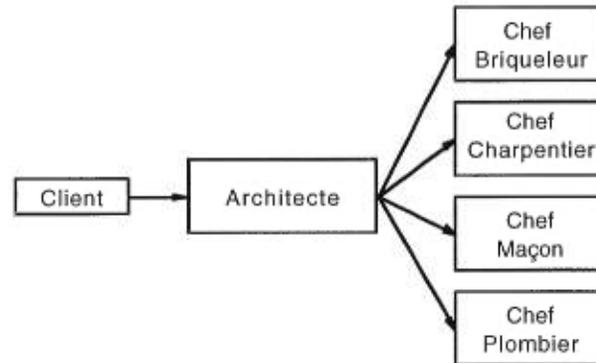


Figure 22. Le *building team* en 1700 (après la Renaissance)

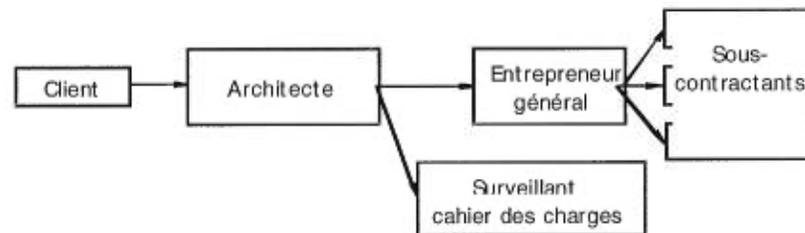


Figure 23. Le *building team* au début 1800

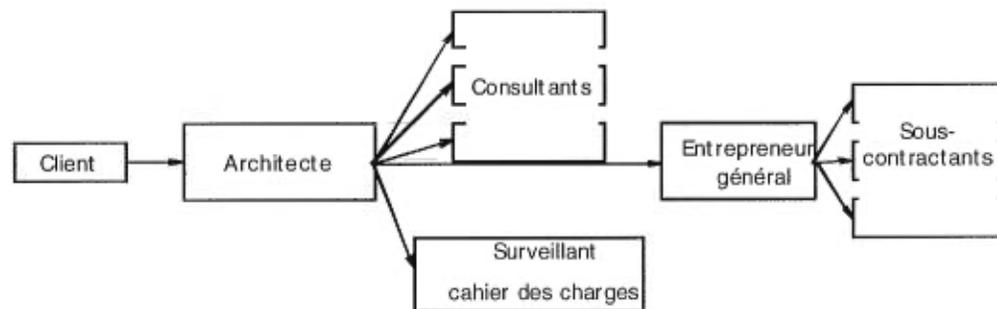


Figure 24. Le *building team* en 1900

Il faut aussi souligner que jamais, aussi loin qu'on remonte dans le temps, l'architecture n'a été l'œuvre d'un seul concepteur. Un grand nombre de participants ont toujours été présents à différents niveaux : le client ou le maître de l'ouvrage, les consultants, les entrepreneurs et encore. Les fonctions de ces acteurs, que W. J. Mitchell appelle le *building team* (1977), ont été définies avec le temps et influencent aujourd'hui à différents niveaux les phases du projet.

Ce groupe de participants s'est créé une structure organisationnelle qui, petit à petit, a émergé en Grande-Bretagne, en France et puis aux États-Unis, de même que dans d'autres pays. Tout particulièrement avec la création des corps de métiers et des corporations (les *guilds* en Grande-Bretagne ou les *compagnons* en France).

C'est autour de la moitié du dix-neuvième siècle, avec la constitution des premiers ordres professionnels (1834 en Grande-Bretagne, 1837 en Suisse, 1840 en France et 1857 aux États-Unis), que le statut de l'architecte est défini clairement en étant dissocié de celui des autres professionnels tels les estimateurs, les géomètres et les ingénieurs.

Au Québec, depuis 1974, le gouvernement a instauré le Code des professions et chaque profession est régie par une loi spécifique. L'Office des professions veille à ce que les corporations professionnelles assurent le bien du public, ainsi que le respect des règlements de la corporation. La corporation professionnelle veille à ce que les personnes qui pratiquent une profession possèdent la compétence requise. Pour cela l'Ordre des Architectes du Québec fait une description des tâches que peut accomplir un architecte en disant que les trois tâches principales sont :

- la conception du projet ;
- la participation à la gestion du projet par les phases de soumissions ;
- la surveillance des travaux.

Les documents de l'ordre poursuivent leur description en disant que la profession d'architecte peut aussi intégrer d'autres tâches telles les études préparatoires, la programmation, l'aménagement des espaces intérieurs, la surveillance continue des travaux, la préparation des dessins après exécution et la mise en service de l'édifice. Et il décrivent chacune de ces tâches.

Pour ce qui est de la conception elle est divisée en deux volets :

- les études préconceptuelles, qui sont celles qui déterminent le programme, étudient la réglementation, les performances techniques ainsi que les organigrammes d'espace ;
- la conception, qui consiste à faire les esquisses du projet et à monter le dossier des préliminaires et le dossier définitif.

Nous voyons donc que rôle de l'architecte tend de plus en plus à être standardisé et qu'il est régi par les associations professionnelles qui reconnaissent et codifient des procédures de travail. Ces procédures définissent le travail de l'architecte et de l'agence d'architecture et normalisent les documents que l'architecte doit produire.

D'après le manuel de pratique de l'Ordre des architectes du Québec sur les documents à produire, le projet passe par trois phases : la conception, l'exécution et la réalisation. (Figure 25) Cette démarche qui détermine la séquence de production des documents tout au long du projet en architecture a été corroborée et vérifiée par une étude exploratoire que j'ai menée en 1996 auprès d'un groupe d'architectes en pratique privée.

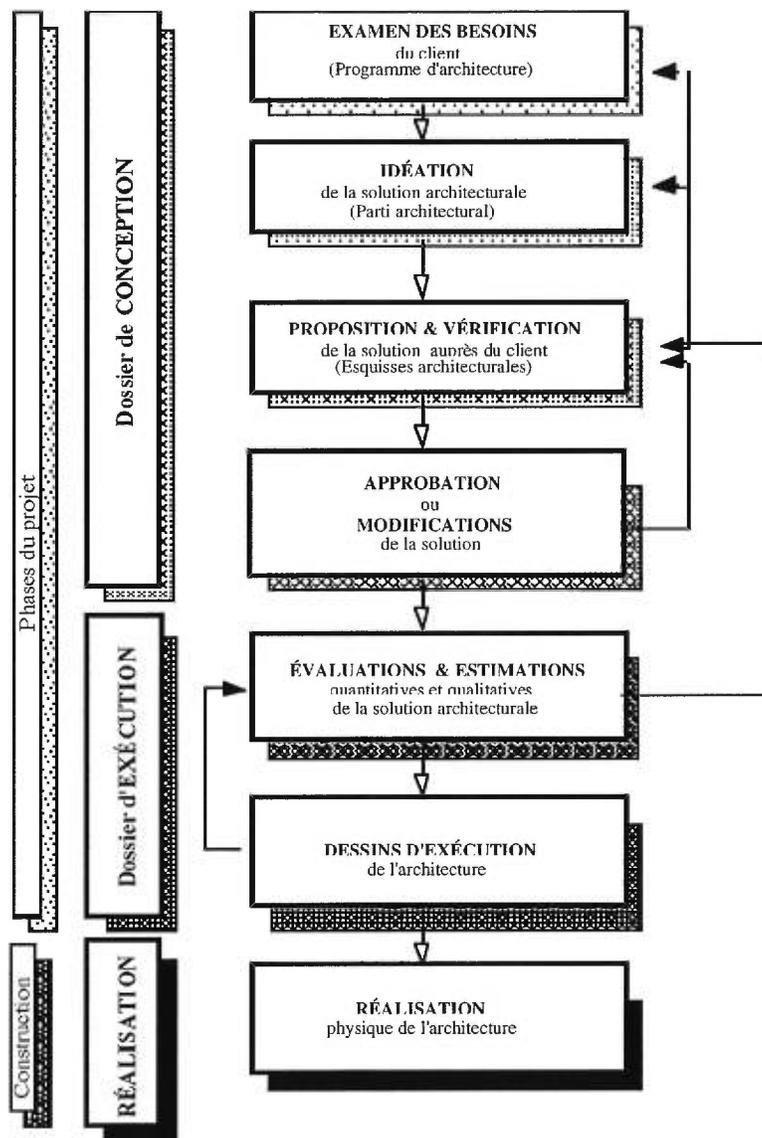


Figure 25. Les documents et les phases du projet architectural

Voilà qui illustre la complexité grandissante de l'information que l'architecte doit traiter et la nécessité, par les ordres professionnels, d'une codification de plus en plus précise. Le traitement de l'information en architecture est aujourd'hui lié à des règles bien établies qui découlent des responsabilités civiles de l'architecte et d'une recherche de précision du symbole de construction toujours plus poussée et plus complexe.

L'outil ordinateur et l'informatique sont entrés dans la pratique architecturale en essayant de reproduire ces modèles et ces méthodes. Les cahiers de l'Ordre des Architectes du Québec et certaines recherches de l'Institut royal d'architecture du Canada font souvent état de ces préoccupations de normalisation, en proposant des méthodes de travail avec l'ordinateur pour «mieux» gérer le projet. Par contre, rares sont les articles sur la compréhension de la figuration sur l'écran. S'agit-il de représenter ou de percevoir? Est-ce que cet outil demande des nouvelles recherches dans des paradigmes tout à fait nouveaux? Ou ne s'agit-il que de continuer et améliorer celui dans lequel l'architecte navigue actuellement?

3.3 La représentation ou la perception

La perception d'un objet est une préoccupation fondamentale dans la représentation de l'espace architectural par l'intermédiaire d'un écran. Cet espace dans lequel l'être humain se promène en faisant appel à tous ses sens pour percevoir et comprendre le bâtiment. Ces sens participent à la visualisation de l'œuvre architecturale parce que cette œuvre aura des dimensions, des proportions, et aussi une odeur, un son, une texture. Ces sens font que le bâtiment est perçu d'une façon dite sensible : «un espace sensible, qui peut avoir une ou plusieurs dimensions. Leur nombre et leur genre dépendent tout aussi bien de l'origine culturelle, et de l'apprentissage individuel, que des goûts personnels de chacun». (Moore et Allen, 1981)

Et, comme le souligne R. Arnheim (1977), «l'architecture est appréhendée dans le temps par l'homme en action». Ce qui signifie que l'architecture, ou la conception en architecture, sont le résultat de plusieurs images, selon une approche séquentielle. Ces images, résultat d'une conception, ne sont pas perçues avec la même compréhension. Certains chercheurs, en particulier depuis les premières théories de la *Gestalt* (de l'allemand forme) école de pensée dont les principaux fondateurs sont M. Wertheimer, K. Koffka et W. Köler qui ont cherché à expliquer comment les images que nous percevons se forment, soulignent que la perception est une série d'images photographiques que nous sélectionnons, un peu comme dans un diaporama, avec un parcours de présentation que l'on pourrait définir linéaire. Ce parcours a une difficulté à s'intégrer à la conception qui a une vision globalisante et qui se donne comme but

une réception de la part des acteurs du processus de création de l'œuvre : un but que je définirais de formateur et informateur, qui doit être «vu» par des acteurs au regard critique et différent. (Figure 26)

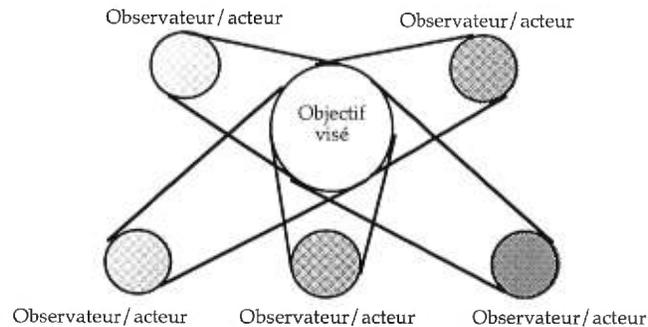


Figure 26. Chaque observateur/acteur vise un objectif avec un regard critique et différent

Il faut aussi souligner que certains principes de la *gestalt* pourraient nous amener facilement à conclure que l'ordinateur est un outil presque parfait pour la représentation. Pourtant cet outil s'est souvent contenté de reproduire l'approche traditionnelle de la perception fond-figure. Approche qui doit être dépassée étant donné la nature particulière de l'architecture. En effet, différemment de la peinture ou de la sculpture, l'architecture exige des nouveaux concepts de perception qui sont liés à son état volumique, à ses liens avec les espaces intérieurs et extérieurs et aux êtres qui y habitent. (Arnheim, 1977)

Une bonne compréhension de la perception est nécessaire pour comprendre les méthodes de représentation actuelles et l'introduction de l'outil informatique dans ce paradigme. C'est important aussi pour savoir si, dans un nouveau cadre théorique où l'informatique peut permettre un changement radical des méthodes de conception, la perception est, par cet outil, vraiment différente. Le but d'une recherche n'est pas seulement d'ajouter des briques à un bâtiment déjà construit, mais aussi parfois de mettre toutes les briques dans un panier et après les avoir mélangées, de chercher un nouveau rapport spatial et sémantique.

Après avoir présenté ses recherches sur la perception de l'image dans *Art and Visual Perception*, R. Arnheim (1977) introduit dans *Dynamique de la forme*

architecturale, une argumentation selon laquelle la dynamique de la forme, des couleurs et des mouvements, constitue «le facteur le plus décisif, bien que plus négligé, de la perception sensorielle», dont le terme dynamique et l'importance de voir, comme le suggérait déjà N. Negroponte au début des années soixante-dix, la perception avec une approche qui s'apparente à la cybernétique.

Des expériences sur la perception et sur son état dynamique, T. Khun en cite une comme étant troublante et menée par deux psychologues pendant les années quarante. Il s'agissait de montrer à des sujets pendant un très court laps de temps, des cartes de jeu, d'une façon séquentielle, l'une après l'autre. Par la suite les sujets devaient les nommer. Le piège était que ces cartes étaient truquées ou mieux, maquillées. Par exemple un valet de cœur noir ou encore un deux de trèfle rouge. Si les cartes passent devant les yeux des sujets très rapidement les réponses sont claires et sans difficulté : les sujets ne relèvent aucune anomalie, le valet est un valet de cœur ou un valet de pique. C'est seulement quand la perception persiste, c'est-à-dire quand le temps de lecture des cartes augmente, que les sujets commencent à hésiter. Ils prennent conscience du problème, sans pouvoir le définir, tel par exemple un contour noir sur un cœur rouge. C'est le temps d'exposition qui finalement permet aux sujets de comprendre le «maquillage». Plus ce temps est long plus les sujets prennent conscience du piège, mais ils sont en même temps désorientés ou troublés.

Cette expérience trouve, selon J. Gleick, sa validation dans l'état d'incohérence dans laquelle se retrouvent les scientifiques quand ils sont soumis brièvement à certaines œuvres de la nature : «Les scientifiques soumis aux visions fugitives, incertaines, des œuvres de la nature, ne sont pas moins exposés aux angoisses et à la confusion lorsqu'ils se trouvent confrontés à une incohérence. Et l'incohérence, lorsqu'elle transforme la manière de voir d'un scientifique, rend possibles les progrès les plus importants». (1989, p. 57) Cette vision de la science devient particulièrement intéressante à explorer lors d'un questionnement sur les changements de méthodes, ce qui est notre cas pendant l'investigation sur les méthodes pour la représentation de l'objet et sur la perception que les acteurs du processus de conception du bâtiment peuvent avoir de l'objet.

Cette vision nous confronte à un nouveau paradigme dans lequel, comme le souligne T. Khun, la science ne progresse pas seulement par accumulation de connaissances, chaque découverte étant une brique qui précède la suivante, dans un

système ordonné, où il s'agit de poser les questions et de trouver les réponses. Selon ses théories, les expérimentateurs font des versions modifiées d'expériences déjà étudiées et réalisées dans le passé. : «les théoriciens ravalent la façade de la théorie, ajoutant ici une brique, remoulant ailleurs une corniche». (Gleick, 1991, p. 56) et finalement il y a les révolutions, une nouvelle méthode, une nouvelle science qui se manifeste à partir d'une autre qui est dans une impasse.

Cette révolution a un caractère interdisciplinaire et ses découvertes sont souvent le résultat de recherches qui sortent de la spécialité traditionnelle dans laquelle elle sont classées. C'est l'impasse dans laquelle se retrouve aujourd'hui, l'architecte, à la pensée «faible» comme dirait G. Vattimo (1987) poussé dans une recherche toujours plus parfaite de la représentation du bâtiment, riche en connaissances sur les techniques de la perspective et de la géométrie descriptive, et en même temps confronté à des outils informatiques qui, d'une façon très élémentaire, essayent de représenter cinq siècles de connaissances techniques. Est-ce que pousser l'outil informatique dans cette direction peut permettre à l'architecte d'adopter cette technologie ou ne devons-nous pas trouver un cadre théorique de travail où la figuration, le passage de l'écrit à l'écran, se réalise par une façon différente de percevoir?

B. Mandelbrot, par exemple, différemment de la plupart des mathématiciens, essayait de comprendre les problèmes en s'appuyant sur son intuition à l'égard des figures et des formes. Selon J. Gleick, «il se méfiait de l'analyse et croyait en ses images mentales. Et il pensait déjà que les phénomènes aléatoires, stochastiques, pouvaient être gouvernés par d'autres lois, ayant un comportement différent». (1991, p. 115) Cette approche me permet d'introduire la problématique sur l'état d'incertitude des architectes dans l'adoption de l'informatique pour la phase de conception, souvent appelée modèle informatif, pendant laquelle, selon T. Tidafi (1996), les acteurs après s'être impliqués dans le processus de conception, ou pendant, essayent de «donner forme» à une solution.

Chapitre 4 Le processus de production du projet d'architecture

Le moyen souvent employé pour les représentations architecturales est le groupement d'images intimement reliées entre elles. Ce choix, selon E. Blau, repose sur une observation maintes fois vérifiée, à savoir que les représentations architecturales sont souvent produites et utilisées en groupement, qu'il s'agisse de dessins, de gravures, de photographies, d'illustrations ou autres. Ce qui signifie que la représentation est un ensemble de groupes d'images différentes et que c'est de cette façon qu'on peut saisir la pleine signification d'une œuvre architecturale.

Pour nous expliquer cette attitude, E. Blau nous dit que, par exemple, une vue d'un édifice fera partie soit d'un groupe d'images représentant les vues, soit d'un ensemble de vues représentant plusieurs édifices d'un endroit donné ou du même genre. C'est-à-dire que l'image du bâtiment aura des significations différentes : celle de présenter l'objet architectural sous son aspect tridimensionnel complexe, celle de voir le bâtiment comme un aspect des lieux, ou encore, comme un des éléments d'une typologie donnée : «ainsi, la même image insérée dans un contexte sériel différent n'entretiendra pas tout à fait le même rapport avec son sujet. Il semble donc que l'interprétation de l'image soit plus révélatrice au niveau du groupe», (Blau et Kaufman, 1989, p. 13) ; la question à ce propos étant de savoir de quelle façon regrouper les images et selon quelles variables. Plusieurs choix se présentent à nous. Celui de regrouper les images par les techniques de réalisation, par exemple, l'ensemble orthogonal développé depuis la Renaissance qui nous permet de ranger l'information sur une seule image synthétique qui décrit les proportions, l'échelle, la forme. (Figure 27)

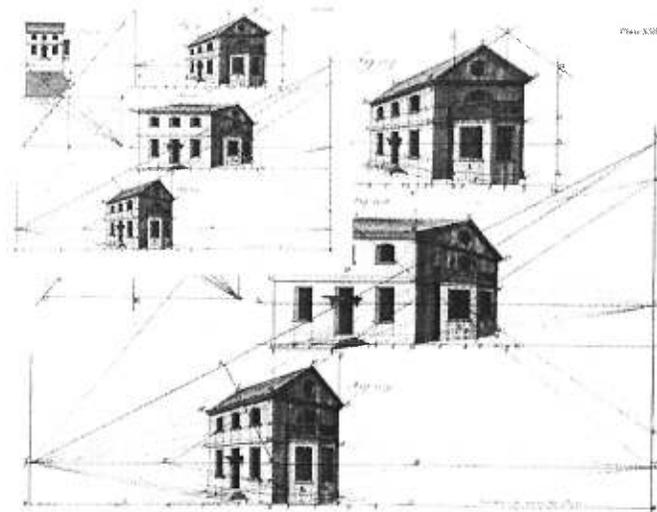


Figure 27. Plan, élévation et trois vues en perspective d'une maison, gravure (T. Malton, 1776)

Ou encore choisirons-nous le carnet de l'architecte, qui a gardé ses croquis de conception décrivant un processus de nature évolutive. (Figure 28)

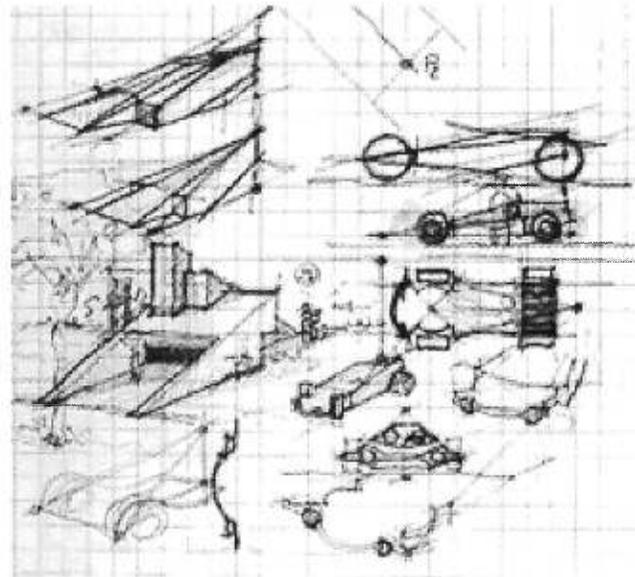


Figure 28. Carnet de croquis (A. Marty, architecte, Villeneuve-de-la-Raho, France, 1998)

Ces systèmes de représentation trouvent leur importance dans l'effort qui doit être fait pour identifier et faciliter la compréhension des différentes techniques mises au point depuis la Renaissance pour représenter l'architecture ainsi que les relations entre

les acteurs du processus de conception. Ils posent aussi le problème de trouver quelle est ou quels sont les liens dialectiques entre ces systèmes, parce que c'est à travers ces liens que nous pouvons trouver un processus de modélisation qui les englobe et que nous pouvons voir si l'informatique peut gérer ces liens et quelles sont les conséquences de cette gestion. L'effort d'unir les «représentations» par systèmes permet aussi une nouvelle réflexion sur les méthodes de production de l'œuvre architecturale et sur la validité de toutes les méthodes depuis l'antiquité. Il ne s'agit pas ici de nier certaines approches, mais de chercher quel est le fil conducteur qui pourrait permettre une meilleure gestion des variables qui interviennent dans le processus de création et de réalisation de l'objet architectural. Il s'agit de voir comment la représentation et la perception peuvent participer et s'intégrer jusqu'à la réalisation du produit final et même après. Finalement, par l'étude de ces rapports entre les groupements d'images ou systèmes de représentation, je veux arriver à une meilleure compréhension de la relation complexe qui existe entre architecture et représentation.

4.1 Les moyens de représentation architecturale

Dans un article sur comment l'architecte conçoit une maison, H. A. Simon (1973) dit que l'idée est assez répandue que l'architecte, pendant la conception d'un bâtiment, se trouve quand il essaye d'être créatif, dans une situation de problèmes non structurés sous plusieurs points de vue. Il n'y a pas au début de critères de définition et de contrôle du résultat, les problèmes spatiaux ne sont pas définis et il faut qu'il compose avec tous genres de structures. L'auteur continue en disant que l'architecte pour «voir» la conception s'appuie sur les rendus et les maquettes pour prédire comment sera le modèle réel une fois construit. Ces maquettes lui permettent aussi de voir les relations entre les composantes, relations que les plans ne pouvaient pas détecter. Mais Simon souligne que dans le monde réel il se trouve des situations non prédictibles.

Finalement, les solutions apportées par l'architecte sont liées à ses connaissances, à sa bibliothèque virtuelle et il lui faut un grand effort de recherche de données. Tout donne à penser, selon l'auteur, que faire le dessin d'une maison est très différent de découvrir la preuve d'un théorème, parce que nous faisons face à des problèmes non définis ou pernicieux.

Pour répondre à cet état de problèmes, comme je l'ai déjà présenté, H. Rittel (1974) ajoute quelques temps après de nouvelles propositions pour des méthodes de conception basées, parmi d'autres, sur les notions de participation, d'argumentation, d'objectivation et d'entente. Ce qui ouvre une voie vers des systèmes de conception architecturale dite de deuxième génération.

À ce propos, V. Rivero, souhaite proposer sur ces bases l'ordinateur comme partenaire de l'architecte. En reprenant les notions de H. Rittel, l'auteur du système de CAAO *Sygma-archi*, s'appuie sur les expériences de *The Architecture Machine* et les travaux de N. Negroponte (Weinzapfel, 1976), en nous disant que l'argumentation entre le client et l'architecte est une version simplifiée d'un groupe pluridisciplinaire et que l'ordinateur ne serait qu'un troisième acteur dans ce processus. Cette approche qui suit de près les premiers pas d'une intelligence informatique n'a pas porté le fruit espéré en architecture, mais elle a permis des nouvelles réflexions pour la recherche d'un nouveau paradigme et des nouvelles problématiques.

A. Farel, dans un article paru dans les cahiers de l'ADRI en 1990, s'interrogeait à savoir si l'informatique était un «des derniers avatars du rationalisme» qui permettra des modifications profondes dans la pensée architecturale, ou si ce n'était pas tout simplement «un outil de haute technicité» au service de l'architecte, pour lui permettre de mieux mener ses activités professionnelles. (Farel, 1991) Tout en continuant ses recherches sur l'architecture et l'informatique et sur le fait qu'il s'agisse ou non d'une nouvelle problématique, A. Farel souligne que pendant le processus de conception, l'architecte est dans sa phase la moins «élucidée», phase dans laquelle l'imagination intervient, mettant en cause mémoire et idéologie. L'auteur continue en disant que le bilan de l'adoption de cet outil pour la conception en architecture est un «échec relatif» et cela à cause de plusieurs facteurs «dont chacun semble constituer une raison rédhibitoire». Il poursuit son analyse en soulignant que la démarche adoptée par les spécialistes et chercheurs a été celle de travailler en termes de résolution de problèmes, ce que A. Alexander appelait *problem solving*. Est-ce que l'activité de conception est seulement liée à la découverte et à la résolution de problèmes métriques d'espace ou physiques de structure ou encore de paramètres moins identifiables mais présents dans la mémoire? Est-ce que le mot confort est lié à un rapport équilibré de chaleur physique dans un espace conçu, ou encore à une chaleur métaphysique ou aux deux?

L'architecte a, comme je l'ai déjà fait remarquer, rempli dans son histoire plusieurs fonctions, allant de chef de chantier, appliquant son savoir-faire, à dessinateur de bâtiment. Et aujourd'hui, il se trouve dans l'impasse d'adopter cet outil pour mieux résoudre les aspects constructifs, formels et autre, dans une approche de plus en plus complexe où le travail «linéaire», un calque après l'autre, a son sens seulement quand tous les calques sont traités en même temps.

A. Forgia (1988), dans une analyse des nouveaux systèmes de représentation du projet architectural, nous rappelle que l'histoire du projet d'architecture est probablement sans fin, mais que l'apport de l'informatique introduit la problématique du statut du dessin dans la pratique de l'architecture et que, de ce fait, elle introduit un nouveau paradigme de la théorie du projet.

En effet l'architecte, pour représenter un futur produit a fait appel, selon les périodes et les techniques, aux plans dessinés, grandeur nature sur le sol, ou à l'échelle, ou encore à la maquette, et depuis la Renaissance, aux dessins perspectifs de Alberti ou géométraux de P. de l'Orme. Les théoriciens de la représentation ont souvent essayé de définir le statut du dessin, comme je l'ai déjà souligné. P. de l'Orme, par exemple, s'interrogeait beaucoup sur le dessin «trompeur» ou mal interprété et sur la rationalisation du projet d'architecture et du dessin.

Nous savons que le dessin peut être analogique, iconique ou symbolique, selon les besoins et que la complexité de l'information contenue dépend du niveau d'avancement du projet : du dessin de présentation à celui, dit d'exécution. Et que les ordinateurs obéissent aux mêmes règles, parce que même aujourd'hui pour des motifs qui vont de la compréhension aux règles contractuelles et sociales, le produit de l'architecte est encore imprimé. Finalement, présenter un cadre théorique de travail dans lequel nous essayons de comprendre en quoi le processus de production du projet d'architecture peut se transformer signifie comprendre et montrer le système de représentation.

4.2 Les systèmes de représentation

Le système de représentation est un ensemble de techniques pour formaliser l'idée ou l'invention d'un futur produit architectural. La compréhension de ces techniques et

les liens entre elles nous permettent de voir que chaque système est un ensemble complexe de techniques. Par exemple, la photographie comprend les techniques optiques, mécaniques et autres. A. Forgia (1988), nous dit que nous pouvons modéliser la photographie comme un système de représentation où il y a, au départ, une prise de données, ce qui est l'enregistrement des informations lumineuses de l'objet. Puis vient un traitement de l'information par le développement de la pellicule et enfin, une communication des informations du produit par la photographie proprement dite. Et il nous dit aussi que cette modélisation est celle d'un système de représentation, de même qu'un processus, parce qu'il y a un changement irréversible dans le temps. La pellicule ne peut plus retrouver son état initial. Pour poursuivre cet exemple, nous pouvons modéliser d'autres systèmes de représentations, et dans tous les cas, en utilisant les méthodes de modélisation systémique, nous nous apercevons qu'une fois défini le type d'information, nous pouvons construire le système qui nous semblera le plus utile et le mieux représentatif.

Continuant cette réflexion nous nous apercevons que si nous réfléchissons sur les systèmes de représentation nous pouvons identifier deux écoles de pensée :

- celle qui se base sur une approche technique de la représentation ;
- celle qui se base sur la gestion de la représentation.

4.2.1 Approche technique de la représentation

L'approche technique de la représentation est celle que nous utilisons couramment, que plusieurs théoriciens ont essayé de perfectionner et que depuis plusieurs siècles, nous avons perfectionnée. Elle a permis les modèles actuels des bâtiments, et selon les époques, une évolution des techniques de construction du formel au fonctionnel ou le contraire. Elle a permis la création de corporations et la spécialisation des métiers, ainsi qu'un dépassement dans l'ingénierie des structures. C'est aussi l'approche que l'on a essayé d'utiliser avec l'introduction de l'informatique.

Et qui nous a permis de réaliser les difficultés techniques du transfert des connaissances des manuels techniques aux logiciels.¹

Cette approche a évolué de pair avec les principes de fabrication du bâtiment. Dans le XX^e siècle, l'architecture a adopté ce que les Américains appellent «*philosophy of the factory*» qui est, comme le souligne P. Bentel dans une analyse détaillée de cet aspect dans sa thèse sur le modernisme et le professionnalisme en architecture aux E.-U., une résultante du fordisme et du mythe de l'ingénieur-manager (1992). Cette méthode a été aussi influencée par les principes organisationnels des travaux : linéarité de production et concentration des fonctions. Ce qui a amené l'architecte à se battre avec les développeurs et les ingénieurs pour légitimer sa place à la tête de cette structure. Ce qui signifie qu'il a dû adopter des méthodes de travail, par le dessin strictement lié à la fabrication du bâtiment. (Tombesi, 1999)

Ce qui signifie aussi que l'organisation de l'information s'est accommodée de ce type de commande et de structure. (Figure 29) L'AIA, association américaine des architectes a publié, dans les derniers manuels de la profession (*The Architect's Handbook of Professional Practice*) beaucoup de documents qui montrent l'évolution de ce processus : la conception qui se situait entre le «programme» et la «construction» dans les années vingt, s'est petit à petit transformée pour être aujourd'hui un ensemble de documents contractuels. Le dessin s'est transformé en subdivisions distinctes et fonctionnelles avec des dessins présentant les phases de développement et les constructions comme nous les voyons aujourd'hui. (Tombesi, 1999)

¹ Il y a quelques années encore, un des logiciels de dessin les plus utilisés ne pouvait pas comprendre et construire une ellipse. Le logiciel Autocad jusqu'à la version 13 (1997) construisait l'ellipse par le truchement d'arcs de cercle.

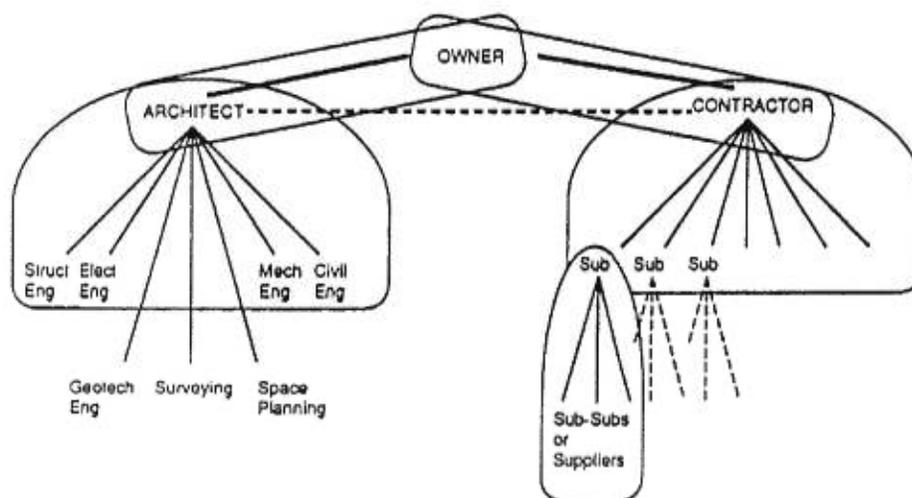


Figure 29. La hiérarchie contractuelle dans le processus de construction (R. Pietroforte, 1992)

4.2.2 Gestion de la représentation

La gestion de la représentation se situe dans le cadre de travail que je vais adopter. Elle nous permet de voir les théories sur la perception avec une approche, que j'appellerai dynamique. Dans *Les Mécanismes perceptifs* (1961), J. Piaget distingue deux dimensions dynamiques pendant le processus de représentation : « Les termes d'opérateur, relatif aux opérations au sens strict, et d'opératif, relatif aux actions de tous les niveaux et aux opérations ». (Lebahar, 1983, p. 24)

Ces termes sont aussi repris par J.C. Lebahar, dans *Le dessin d'architecte. Simulation graphique et degré d'incertitude* (1983) pour qui « l'opérateur désigne la logique qui permet d'organiser un problème, au niveau de ses données et de leur traitement, de manière adéquate aux besoins du raisonnement (un organigramme est opératoire pour mettre en place un schéma de circulation entre les parties d'un bâtiment compliqué). Alors que l'opératif désigne non seulement ce qui est opératoire mais aussi l'enchaînement pragmatique d'actes imaginés en pensée (un opérateur dira : pour faire le relevé d'une ferme, je vais repérer les dimensions des diagonales en premier ce qui m'évitera de calculer les angles de ce bâtiment sur le terrain, etc.) ».

Ces analyses sur l'opérateur et l'opérationnel permettent à A. Forgia de faire ressortir que l'architecte, qui utilise les nouveaux systèmes de représentation, se trouve confronté à une double articulation, c'est-à-dire l'articulation de deux dimensions dynamiques telles que les distingue J. Piaget :

- pour l'organisation de l'utilisation du dessin par l'architecte ;
- pour l'organisation des nouveaux systèmes de représentation et la conduite du processus de production de représentation. (1988, p. 49)

Cette double articulation met en évidence une des difficultés méthodologiques de l'intégration de cette nouvelle technologie dans le processus de production du projet d'architecture actuel. Tout en soulignant que, pour l'instant, le dessin reste l'outil principal de l'architecte, dont la formation est liée aux règles dictées par les théoriciens des siècles passés, mais qui se trouve de plus en plus confronté à un processus de production qui n'est plus arborescent ou séquentiel, mais à un réseau de projets et à un enchaînement où les «buts opérationnels définissent les articulations dialectiques». (Forgia, 1988) Nous sommes amenés à comprendre le projet d'architecture par une modélisation systémique du processus. Cette modélisation, à valeur heuristique, a pour but :

- de décrire des relations entre les acteurs du projet par la distribution et le traitement de l'information ;
- d'identifier des niveaux d'intervention entre les «systèmes» de représentation ;
- d'organiser le projet pour permettre aux systèmes de représentation d'avoir un ensemble d'actions cohérentes afin d'informer le modèle opératoire qui représente l'œuvre architecturale à produire. (Figure 30)

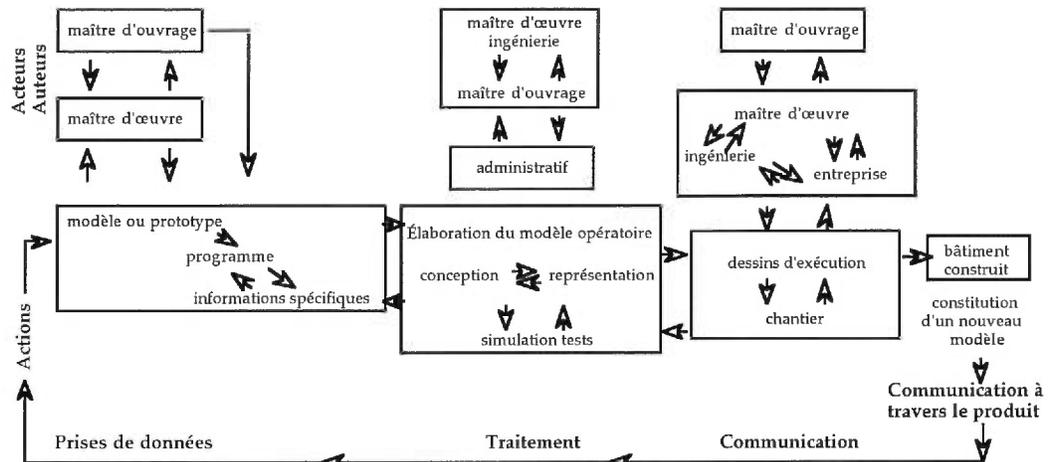


Figure 30. Processus du projet d'architecture (A. Forgia, 1988)

J'ai, depuis le début de cette étude sur l'architecture et l'informatique, voulu souligner le caractère complexe du projet d'architecture et comment la préoccupation des théoriciens, ordres professionnels et acteurs de ce processus a été de chercher une simplification du processus par le dessin. L'informatique nous place actuellement devant un constat où cet outil, le dessin, tout en étant informatif, peut difficilement être formatif, parce qu'il néglige les réseaux de relations entre les différents types d'objets dont est composé le bâtiment et parce qu'il néglige aussi la manipulation de ces types d'objets.

Ces objets paraissent uniques, souvent non transférables. Mais en même temps, l'informatique nous permet d'explorer une voie toute nouvelle, où ce sont les relations entre les systèmes de représentation des objets, plutôt que les objets eux-mêmes, qui sont la clé du processus de conception. Cette approche nous permettra de concevoir des noyaux d'inférence qui peuvent interagir entre eux et communiquer le savoir et les savoir-faire. Dans ce cadre, il est important voire fondamental d'arrêter notre réflexion dès la phase de prise de données. Pour exister, un projet doit avoir des objectifs. Cela implique que les systèmes de représentation doivent être définis pendant la phase de prise de données.

L'organisation du projet que j'ai présentée et que les ordres professionnels suggèrent se trouve remise en question. Il ne s'agit pas de phases séquentielles, mais d'allers et retours entre les relations créées par un ensemble de projets de représentation. La division entre les différents moments de traitement de l'information (phase de cueillette des données, suivie d'une phase de conception, et ainsi de suite, se trouve remise en question, car pour faire des simulations valables, il nous faut des informations manipulables. Le modèle opératoire, devient représentation, ce qui signifie qu'il est nécessaire de comprendre le processus de traitement de l'information qui informe le modèle opératoire ainsi que le processus de transfert des informations lors des simulations.

4.2.3 Le statut de l'image et la forme à travers l'image

La problématique développée jusqu'ici s'articule autour des concepts de représentation, de perception et de systèmes de représentation. Elle tient aussi compte du fait que l'outil dessin est un bon produit pour décrire le projet, pour s'associer au processus de construction et enfin, que les outils informatiques actuels ont suivi les mêmes principes de représentations que ceux dictés par le dessin géométral. Mais la conception, cette phase où l'on débat les choix fondamentaux du projet, est encore exclue, c'est-à-dire que le concepteur ne fait usage ni de l'outil informatique, ni de l'informatique pour avoir une aide à la conception de l'œuvre architecturale proprement dite. Et l'on tend à confondre conception avec logique de production.

Selon J.C. Burdese, il «se forge un idéal positiviste où tout est question de méthode : maîtrise d'une méthode de production du projet progressive, continue, cumulative». (1988, p. 43) Ou, comme le souligne J.C. Lebahar, «la situation de projet est une situation de résolution de problème. Elle met l'architecte qui y est confronté en demeure de produire une solution. Un architecte, un problème, un problème une solution, ajoutons-y un utilisateur et/ou client, et nous aurons complété l'inventaire par le dernier élément». (1983, p. 15)

Enfin, la phrase souvent entendue dans les ateliers des Écoles d'architecture : «à un problème un dessin» prend toute sa place ; plus le projet sera riche en détails et en informations mieux il sera, tous les détails y seront étudiés, en essayant de ne rien

laisser au hasard. Pourtant, selon plusieurs chercheurs (Lebahar, 1983 ; Burdese, 1988) il faudrait s'arrêter plus longtemps sur l'esquisse, car une bonne maîtrise de l'abstraction est souvent nécessaire à la formalisation du projet. La nécessité de figures abstraites de logique, dynamiques, seront d'autant plus efficaces si elles s'éloignent de toute forme architecturale, des maquettes procédurales donc, qui réduisent les blocages dans la communication visuelle parce que «Le besoin excessif d'une visualisation nette [...] est caractéristique d'une personnalité rigide non créatrice, incapable de lâcher prise sur les fonctions de surface». (Ehrenzweigh, 1974, p. 72)

Il ne s'agit pas dans ce cadre théorique de proposer une meilleure maîtrise des outils informatiques, mais d'arrêter notre réflexion sur la conception et les possibilités d'utilisation de l'informatique dans cette phase. Réflexions qui mettent en évidence une autre problématique sur l'utilisation de l'ordinateur dans le processus de conception, la gestion de l'image. A. Farel nous rappelle, à ce propos que «la matière de la conception est l'image (Guibert, 1981) et ce à différents niveaux :

- l'imaginaire de l'architecte travaille à partir de références visuelles mémorisées, résultant de son histoire personnelle et du contexte culturel et social dans lequel il évolue ;
- l'architecte imagine (projette des images vers le futur) des objets, les représente graphiquement, les évalue, les modifie, etc. Le va-et-vient entre l'image mentale et l'image dessinée est permanent, la trace graphique s'avérant être à la fois fruit de la pensée et germe pour la pensée suivante ;
- corollairement, c'est dans et par l'image que le concepteur tente de résumer les contradictions du projet, et propose des moyens de les dépasser. Elle est lieu de condensation des conflits et terrain des compromis au réalisme technique et dimensionnel, d'où son rôle heuristique toujours irremplaçable.» (1991, p. 76)

Cela signifie que l'activité mentale de l'architecte est le résultat d'images mentales et qu'il y a donc une difficulté à modéliser l'image. Ce qui est vrai si l'«image» que nous voulons traiter est à la base de la problématique de l'utilisation de l'ordinateur pour la conception. T. Tidafi, nous a déjà montré que cet outil peut être extrêmement performant et novateur, tout particulièrement dans sa capacité de modéliser les savoir-faire. (Tidafi, 1996) Les images traitées dans ce cas sont géométriquement bien définies et elles servent de modèle pour la compréhension de l'état constructif du bâtiment.

De cette manière, elles peuvent être une imitation virtuelle de l'objet à représenter. Mais notre préoccupation est liée à un état perceptif et dynamique. R. Arnheim (1974)

nous rappelle que l'œil ne peut enregistrer une image complète d'un objet tridimensionnel à partir d'un seul et unique point de vue. En effet, nous savons qu'il s'agit d'une projection bidimensionnelle qui ne peut représenter plus d'un seul point d'un objet au même endroit. Et Arnheim nous dit que c'est en raison de cette limitation de la vision que l'humain, par son esprit, pour comprendre et appréhender un objet tridimensionnel, doit dépasser cette information obtenue seulement d'un point de vue.

Comment alors cette figuration, qui représente le traitement de l'information par l'architecte, est-elle traitée? S'agit-il d'un traitement dynamique, tel que défini par R. Arnheim, dans *Art and Visual Perception*? Est-ce qu'un traitement qui suit les règles énoncées par les ordres professionnels dans leurs listes de documents à produire pour la réalisation et la rationalisation d'un projet peut être dynamique?

4.2.4 Le projet d'architecture

Necessitas, commoditas, voluptas, ces trois termes latins résument tout l'effort fait depuis Vitruve (Ier siècle av. J.-C.), en passant par Alberti (1404-1472), jusqu'aux recherches menées dans les années soixante par C. Alexander pour essayer de rationaliser la démarche de l'architecte et la manière dont il doit traiter l'information.

Comment opère-t-il aujourd'hui, l'architecte? Pouvons-nous décrire ses méthodes de travail?

Comme nous l'avons pu saisir de la problématique présentée jusqu'à maintenant, l'architecte, aujourd'hui, aborde spontanément par une approche globale l'objet qu'il doit concevoir. Dès le début, son idée est matérialisée par des esquisses, des dessins, des écrits et est ajustée au cours du processus de conception, en devenant de plus en plus précise jusqu'à en arriver à ce que l'on appelle le parti architectural, en suivant un modèle qui s'apparente à celui qui est représenté à la Figure 31.

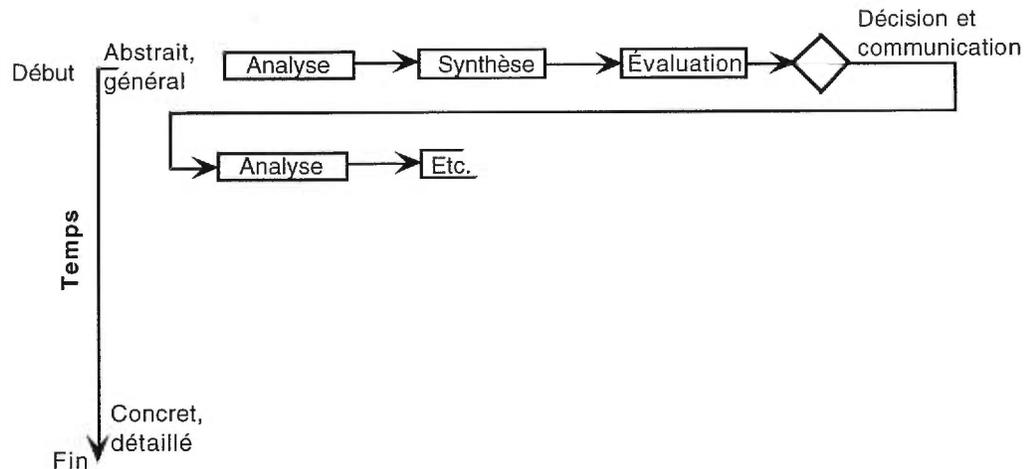


Figure 31. Modèle du processus de design d'après Markus (1972)

Le produit architectural final sera le résultat et la cause d'un processus articulé qui commence avec la formulation du modèle informatif, se prolonge dans le modèle productif et s'achève avec le modèle réel. (Ciribini, 1973)

Le modèle informatif est exprimé par des documents produits sous forme graphique et textuelle qui diffèrent selon les personnes auxquelles ils s'adressent. Ces documents sont l'expression d'une méthode pour appréhender l'objet. Les formes ne sont pas définies précisément, ni les dimensions. La conception est au stade des proportions : physiques, spatiales et économiques. L'architecte, pour communiquer l'idée, utilise un vocabulaire de symboles graphiques qui expliquent les fonctions et des textes qui justifient le parti architectural.

Le modèle productif est exprimé par des épures qui contiennent l'information technique permettant aux entrepreneurs de planifier leur travail et de procéder à la mise en œuvre. Ces épures sont complétées par des rapports qualitatifs et estimatifs et elles sont regroupées en fonction des disciplines auxquelles on les destine.

Le modèle réel sera réalisé par les entrepreneurs qui suivront les épures et procéderont, selon la complexité du travail, aux modifications et corrections qui s'imposent en cours de route.

Ce processus laisse déjà entrevoir (Figures 32 et 33) la complexité des documents que l'atelier de l'architecte doit produire, de même que la redondance de l'information ainsi traitée.

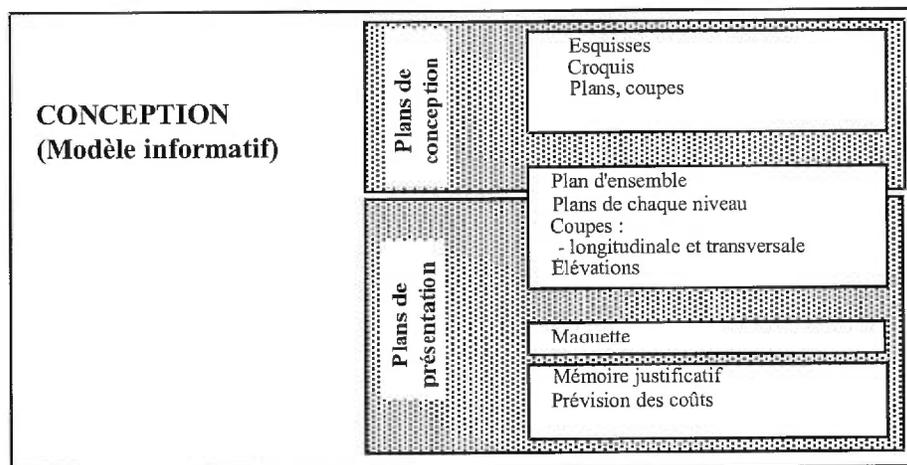


Figure 32. La phase de conception

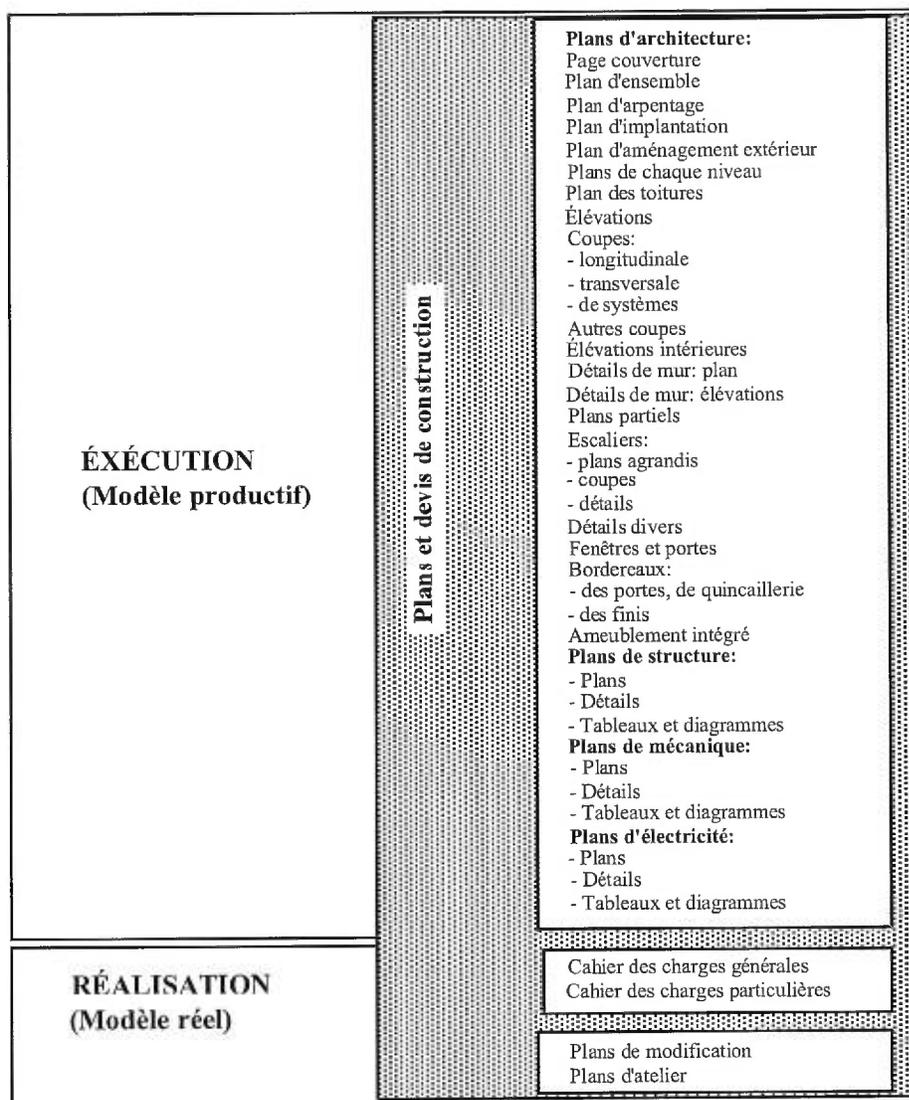


Figure 33. Les phases d'exécution et de réalisation

À propos des phases de conception d'exécution et de réalisation du projet, T. Tidafi explique que la conception est un processus pendant lequel la communication est omniprésente : «en effet un acteur, tel un architecte, engage ses premiers échanges dès le début de la commande et peut la poursuivre pendant tout le processus de conception qui prend fin à la livraison du résultat de ce processus : le bâtiment». (1996, p. 13) Cette transformation continue d'une solution architecturale peut présenter différents types de communication. Plusieurs chercheurs ont essayé d'identifier au moins sommairement ces communications en les associant à la conception, aux intentions au savoir-faire. (Prost, 1992) T. Tidafi, après une analyse

de ces recherches reconnaît cinq types de communication susceptibles de se produire entre différents acteurs :

- un premier qui a lieu au tout début d'un processus de conception, où les acteurs du projet s'impliquent sur l'énoncé d'un problème d'architecture, par des écrits, des schémas, des photos et d'autres documents que dans les ateliers d'architecture on appelle couramment «les précédents» ;
- un second type de communication peut être identifié au stade de la recherche d'une solution à un problème. Dans cette phase les acteurs essayent de «donner forme» à une solution. Selon T. Tidafi cette deuxième phase peut être simultanée à la première. Les documents des «précédents» se transforment en croquis et esquisses et en modèles permettant de visualiser les orientations formelles pour la solution architecturale ;
- un troisième type de communication peut avoir lieu dès qu'une solution architecturale est suffisamment définie pour être traduite par la géométrie. Cette phase est celle qui permet d'évaluer la solution. Les acteurs et les concepteurs discutent des solutions coût etc. ;
- un quatrième type de communication peut avoir lieu après le choix du «parti» architectural, et on y traite de concrétisation matérielle ;
- enfin, le cinquième type de communication est l'application concrète de la solution formulée. L'objectif de cette phase est de donner aux acteurs tous les moyens informatiques pour appliquer concrètement la solution et d'en évaluer la faisabilité.

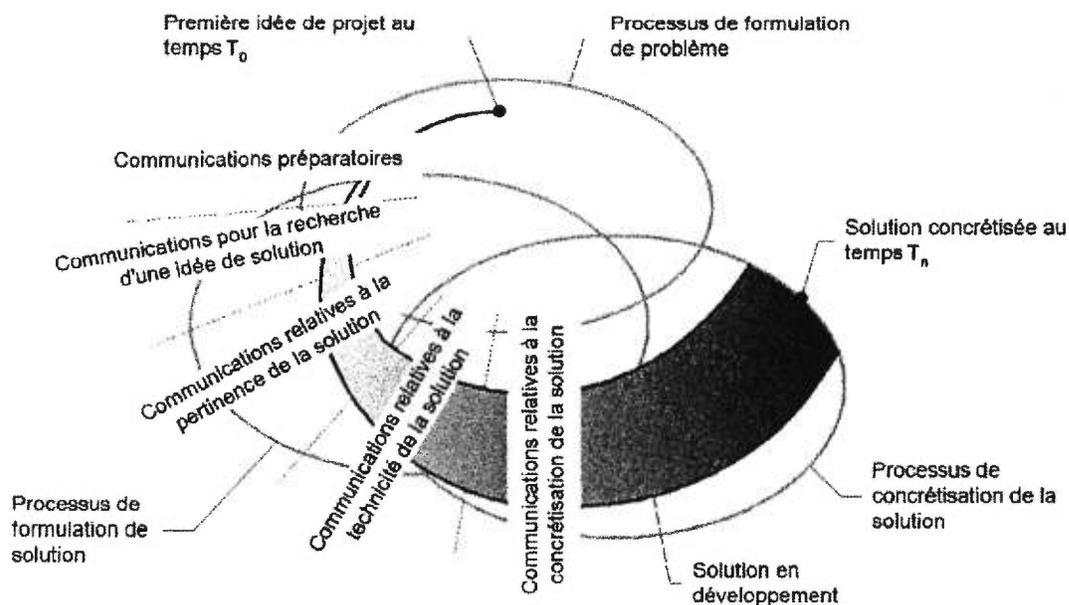


Figure 34. Cinq principaux types de communication du processus de conception architecturale (Tidafi, 1996)

Pour montrer schématiquement ces cinq types de communication reconnus, T. Tidafi en explique le fonctionnement par un exemple (Figure 34) :

«Les ellipses en trait grisé, désignent les trois processus enchevêtrés d'un processus de conception (Processus de formulation de problème, processus de formulation de solution, processus de concrétisation de la solution). Le point inscrit dans l'ellipse représentant le processus de formulation de problème indique la genèse au temps T_0 , de la première idée de projet d'architecture. De ce point, deux lignes courbes sont acheminées à travers les trois ellipses jusqu'à un nouveau point indiquant une solution concrétisée à un temps T_n . Entre ces deux points, les deux lignes courbes s'écartent graduellement pour illustrer la précision progressive de la définition d'une solution architecturale. De même, le dégradé de gris entre T_0 et T_n , remplissant la surface délimitée par ces deux lignes courbes indique le rétrécissement progressif de l'espace des solutions possibles pendant la durée d'un processus de conception. Sur les deux lignes courbes, sont tracés transversalement des segments de droite entre lesquels les cinq types de communication reconnus sont mentionnés. Ces segments de droite sont tracés en traits pointillés pour souligner que ces cinq types de communication ne sont pas cloisonnés et peuvent se chevaucher.» (1996, pp. 21-22)

Dans sa présentation, l'auteur termine en disant que les trois derniers types de communications sont particulièrement intéressants pour être retenus pour la poursuite de sa recherche parce que pendant ces stades, la solution formulée, tout en n'étant pas

encore réalisée concrètement, est suffisamment avancée pour «pouvoir être considérée comme si elle était déjà un objet architectural pouvant avoir une matérialité». (1996, p. 22) Ce qui lui permet d'être évaluée par les acteurs participant à la communication. Les trois stades permettront à ces acteurs de prendre de nouvelles décisions ou d'accomplir de nouvelles actions.

Les deux premiers types de communication, non retenus par T. Tidafi, qui visent l'énoncé d'un problème en architecture et la recherche d'une formulation pendant que les acteurs essaient de donner une forme à une solution, sont ceux qui s'expriment couramment par des croquis, des ébauches. Ces types de communication sont jusqu'à présent difficiles à comprendre et l'outil informatique est pratiquement absent.

Je retiens ce modèle présenté par Tidafi et sur lequel l'auteur a développé sa thèse de doctorat en se concentrant sur les 3 derniers types de communication, parce que ce modèle montre clairement quels sont les types de communication dans la description du processus de concrétisation d'une solution architecturale. De plus les résultats des recherches de Tidafi proposent, pour une meilleure communication du projet d'architecture, l'évaluation continue des solutions formulées, selon leur stade d'évolution ; ces solutions seront amenées progressivement à un niveau de détail devant permettre sa réalisation sur un chantier de construction.

Et je choisis de concentrer mes recherches sur les deux premiers types de communication, au tout début d'un processus de conception, tout en cherchant un lien entre ces deux volets de la communication en architecture.

4.3 Le pourquoi du choix du modèle informatif

Nous avons vu que, au tout début d'un processus de communication et pendant la première phase de recherche d'une solution à un problème, plusieurs facteurs peuvent avoir un impact important et que la formalisation est encore difficile. Nous sommes confrontés à des modèles qui font appel pour leur constitution à des facteurs immatériels, tels la sensibilité, le contexte et autres. Cet «instant» est très important lors de la conception, parce qu'il est extrêmement riche. Il comprend les savoir-faire du passé et les savoirs du concepteurs. Il pourrait permettre l'intervention des acteurs dès

le processus de départ, avec une démocratisation du geste architectural et une possibilité d'intervention et de rétroaction dès le tout début du processus de conception.

Cet «instant» correspond à la phase informative, ce qui signifie qu'on pourrait garder cet «enrichissement» des connaissances pour d'autres projets ou conceptions. Enfin, il briserait cette dichotomie entre la phase de conception théorique et de conception-réalisation du projet, tout en s'insérant jusqu'à la réalisation en permettant aux solutions formulées de ne pas être définitives et en permettant un retour sur les décisions prises pendant le processus de conception.

T. Tidafi, pour expliquer son choix, prend l'exemple des personnes qui auraient comme projet la construction d'une maison, expliquant qu'elles pourraient intervenir pour essayer de comprendre comment la maison est organisée, si les espaces prévus répondent aux besoins et enfin, aller jusqu'à la meubler, ou quantifier les matériaux. Par contre, ils ne pourront pas savoir si ces choix comprennent des facteurs sensibles, tels l'acoustique des pièces ou si cette «qualité» peut être utilisée comme point de départ d'une première esquisse ou encore si elle doit être traitée, par des opérateurs et en même temps que d'autres opérateurs. Les personnes ne sauront non plus comment les savoirs de l'architecte tels ses connaissances des habitudes de vie d'une population participent à l'esquisse de départ. Ils peuvent seulement le supposer.

Enfin, si nous pouvons intégrer cette première phase du processus de conception, le prototype avec lequel le concepteur travaille pourra être enrichi des opérateurs précédents, riches en signification et que j'appelle opérateurs sémantiques. Ce choix me convainc que, par une nouvelle présence de l'informatique comme fédérateur des phases de conception et des acteurs de ce processus, je peux répondre à ma question de départ : «comment l'architecte peut-il tirer parti de la CAO considérant qu'il a développé un langage et des méthodes de travail adaptés à la représentation bidimensionnelle?» et probablement dépasser ce que les derniers cinq siècles ne nous ont pas permis de faire avec le dessin traditionnel.

Nous avons vu que dans les processus de conception, présentation et réalisation du projet tel que présentés dans les documents produits par les ordres professionnels (Ordre des architectes du Québec, *American Institute of Architects*) il y a un stade,

que Ciribini (1973) appelait informatif et qui est un moment privilégié de *collaborative design* où se créent les accords entre les intervenants.

Est-ce que à ce stade, la vision que nous avons des premières esquisses est tributaire de nos connaissances? Selon les récentes théories sur la perception de l'image et de l'objet, la perception dépend de la compétence de la personne qui perçoit et elle est le résultat d'observations non forcément objectives. Un architecte, par exemple ne devrait pas s'arrêter à l'enveloppe visible, mais il devrait formuler des hypothèses sur l'organisation des espaces, les circulations, la structure du bâtiment, et plus selon ses connaissances et son expérience.

En somme, pendant les deux types de communication retenus, à l'aide de l'outil informatique, le concepteur et les acteurs d'un processus de conception architecturale peuvent s'intéresser non seulement aux premiers moments qui matérialisent une solution mais aussi au côté immatériel en fonction de leur sensibilité. Cette nouvelle approche avec l'aide de l'outil informatique, est aussi une contribution aux recherches en CAO qui, depuis presque quarante ans, n'ont pas encore trouvé une solution qui permette à l'ordinateur de traiter les fameux *wicked problems* de Rittel et de Simon.

Chapitre 5 La conception par ordinateur en architecture

Le développement de la CAO en architecture commence au tout début des années 60. Jusque-là, le traitement informatique des données graphiques était relié à l'industrie aéronautique et au génie mécanique.

Le projet d'architecture est alors de plus en plus complexe, la quantité de documents à produire de plus en plus grande et, nous avons vu, une théorie de segmentation et subdivision du bâtiment pour pouvoir en extraire des sujets, créer des étapes de travail, étudier des fonctions et des rôles d'activités, est la bienvenue. Il est évident que les méthodes (standards architecturaux, listes de contrôle, gabarits de travail) et les outils (calculateurs et ordinateurs) développés durant cette période ont été créés pour répondre à ces exigences. Nous assistons à l'identification de subdivisions artificielles, comme la subdivision du bâtiment en couches de travail, et à une séparation toujours grandissante entre l'architecte et les intervenants non spécialistes.

Mais il faut souligner que c'est seulement depuis les années 80 et en particulier avec l'apparition des micro-ordinateurs que l'architecte s'est intéressé activement à ce nouvel outil. L'ordinateur tend alors à remplacer les outils traditionnels pour élaborer le projet d'architecture, comme l'a souligné, avec une mise en garde, A.Farel :

«On peut donc, sans risque de se tromper, parler d'une révolution technique dans la pratique professionnelle. L'utilisation des outils de la micro-informatique va, entre autres choses, modifier les types de documents que l'architecte montrera à ses clients, et bouleverser l'organisation du travail au sein de l'agence ; cela est certain. Est-il pour autant légitime, voire réaliste, d'envisager des changements radicaux permettant de parler de conception assistée par ordinateur?» (1991, p. 67)

Tel que mentionné précédemment, le développement des outils s'est fait selon l'approche de rationalisation qui prévalait dans les années soixante-dix et encore aujourd'hui. Le qualificatif d'outil de CAO est inapproprié, il serait mieux avisé de parler de DAO ou de CDAO. Avec l'évolution technologique des ordinateurs et des logiciels, on a commencé à parler de CADD (*Computer Aided Drafting and Design*) et de CAD (*Computer Aided Drafting*). Le premier terme (CADD) désigne des logiciels capables de faire de la modélisation et de la production de dessins. On le traduit en français par CDAO (Conception et Dessin Assistés par Ordinateur). Le deuxième

terme (CAD) correspond en français à DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et désigne plutôt des logiciels dédiés au tracé de plans, avec certaines possibilités de projection dans l'espace des formes établies en plan. (De Paoli et Pellissier, 1992)

Jusqu'à la fin des années 80, la CAO est encore considérée comme un moteur accélérateur du traitement de l'information et la plupart des réflexions des chercheurs se concentrent soit sur des méthodes de formulation de solution pour l'architecte (Mitchell, 1989), soit sur des solutions techniques et analyses du bâtiment, ou soit encore sur des modes de figuration virtuelle. (Cadoz, 1994)

À l'intérieur de la pratique architecturale, les applications de dessin par ordinateur se multiplient et prennent place pour permettre aux designers et aux architectes d'utiliser l'ordinateur comme outil de dessin performant plus que comme outil de conception. Outil qui, encore aujourd'hui, n'a pas permis la normalisation et l'échange de l'information entre les acteurs du projet, nonobstant les différents efforts déployés pour établir des standards et pour trouver un lien convivial.

5.1 Nouvelles approches de la CAO pour tirer parti de l'informatique

Les quarante dernières années ont été le théâtre de débats fondamentaux sur les méthodes de conception en architecture et sur l'utilisation de l'ordinateur par les architectes. Bien que le DAO, la CDAO, la CAO aient mis en œuvre des systèmes de traitement de l'information qui offrent de précieux services aux architectes et à leurs équipes de travail, nous sommes confrontés à une impasse liée aux difficultés de modéliser le processus de conception. La liberté cognitive de l'architecte en situation de créativité continue à s'exercer en dehors du cadre informatique bien que l'un de ses buts ait été de fournir une aide au processus de conception. Cet état de fait met en évidence les limites des outils informatiques, néanmoins capables d'enregistrer, de manipuler et de transformer des symboles, des objets et des images pour aider le concepteur dans le processus qui l'amène à la réalisation du projet. (Lassoed, 1991)

Les études de C. Alexander et M. Asimov, parmi tant d'autres, devaient servir à définir des systèmes cohérents presque mathématiques et facilement informatisables, mais les méthodes qui en découlent se sont avérées difficiles à adopter par les

architectes dans la pratique. Sensibles à cette impasse, des chercheurs tels J. Wang et P. Purcell choisirent comme démarche l'observation des comportements des concepteurs lors de l'exécution de leurs tâches pour identifier les différentes activités et les codifier dans le but de décrire des méthodes de conception. (Broadbent, 1971)

L'idée couramment admise était qu'une bonne programmation devait permettre de définir les problèmes et qu'un outil adéquat utilisant un langage logique devait permettre de manipuler l'information complexe du programme pour aboutir logiquement à la bonne solution. Mais les chercheurs se sont vite rendu compte, avec l'introduction des ordinateurs, que les propositions méthodologiques n'étaient pas «lues» logiquement par l'ordinateur. En effet, la formulation de départ étant souvent incomplète et non définitive, cela soulevait une difficulté de modélisation.

Depuis les années 80, les ordinateurs ont atteint un stade de développement tel qu'ils pourraient offrir une solution de rechange aux représentations traditionnelles sur papier. C'était le pari des années 70 quand on affirmait que les ordinateurs allaient remplacer rapidement les tables à dessin. Tout ça ne s'est pas produit et les ordinateurs, nonobstant des progrès énormes du côté technologique, n'ont pas modifié les méthodes de travail des architectes qui continuent, à quelques petits ajustements près, à travailler selon les méthodes traditionnelles. (Farel 1991 ; Eastman, 1991)

Nous avons vu que les développements en CAO ont été réalisés tout particulièrement sur les programmes de dessin, le but étant d'aider la visualisation au moyen des programmes de modélisation géométrique fondés principalement sur la géométrie euclidienne. Bien que la visualisation soit un aspect très important du processus de conception, les outils actuels demandent que ce processus de conceptualisation soit à toutes fins pratiques achevé pour pouvoir visualiser le concept : l'architecte spécifie un design et l'ordinateur affiche passivement le résultat. (Gero, 1987) L'adoption de l'ordinateur par les concepteurs a poussé la recherche vers des systèmes basés sur l'acquisition de connaissances (intelligence artificielle) pour faciliter les étapes d'analyse, de synthèse et d'évaluation du design dès le début de la phase de conception.

Ces nouveaux systèmes se distinguent par le type de «raisonnement» basé sur des inférences (déductions) et l'utilisation d'une approche symbolique, plutôt que sur un calcul numérique basé sur l'algèbre et l'arithmétique. Ce qui contribue à rendre le

processus de design explicite et plus transparent, contrairement au fonctionnement de la plupart des ordinateurs où «la connaissance» est implicite.

Plusieurs recherches, depuis la fin des années 80, se sont orientées dans cette direction. J. S. Gero (1987), par exemple, propose d'explorer le sujet en étudiant trois phases qu'il ne veut pas hiérarchiques, mais complémentaires et interactives, et en évaluant le rôle qu'un *Knowledge-based system* peut jouer pour les supporter :

- le *Design Analysis* ou *Formulation*: au cours de cette phase la formulation du problème a un effet direct sur la solution et la transforme dans une forme qui correspond à la description originale ;
- le *Design Synthesis* : cette phase implique l'exploration de solutions conceptuelles pour résoudre le problème. Les méthodes utilisées au cours de cette phase sont multiples et J.S. Gero propose d'en analyser deux : la grammaire et son design et la recherche heuristique ¹ ;
- le *Design Evaluation* : implique l'interprétation partielle ou complète d'une partie spécifique du dessin pour en vérifier sa conformité avec les buts ou les performances attendues.

J. Zoller, du GAMSAU (Groupe d'études pour l'application des méthodes scientifiques à l'architecture et l'urbanisme), propose l'étude de la modélisation sous contrainte, tout comme d'ailleurs M. Gross de l'École d'architecture du MIT. Lors de

¹ «*Design grammars commence with an initial state in the state-space and use knowledge in the form of context dependent rewrite rules to generate next states (Gero and Coyne, 1985; Flemming et al., 1986; Hanson and Radford, 1986). Thus, a design grammar contains within itself the knowledge to define completely a statespace which might be finitely or infinitely bounded). Design grammars have the potential to enumerate a state-space.*» (Gero, 1987)

«*Grammar here is used in a formal, technical sense, a grammar being a particular type of mathematical construct. The word was first used in this technical sense by Chomsky (1957), who defined various types of formal grammars in his quest to find a mechanism that would generate exactly the set of "grammatical" English sentence. Chomsky, of course, developed grammars that generate sequence (strings) of symbols. Other types of grammars have since been developed that generate arrays, trees, graphs, or shapes.*» (Stini, 1980)

«*Heuristic Search is the process for moving from one state to another in the state space. Since the number of states in design state space is large, blind or exhaustive search is rarely used. The alternative is guided search in which strategies for controlling the search utilise the knowledge in the knowledge base. Some common strategies are forward and backward chaining and some common representations are rules and frames.*» (Gero 1987)

la modélisation, les relations d'assemblage d'objets sont manipulées de façon implicite, objets complexes prédéfinis constitués d'objets plus élémentaires mis en relation, ou de façon explicite lors de l'assemblage de ces objets complexes. Ces relations résultent de choix architecturaux et répondent aux lois physiques de la construction (pesanteur, stabilité, ...) : « nous pensons qu'elles peuvent être mises en place de façon semi-automatique par un système expert ».¹ (Zoller, 1996)

W. Mitchell dans *the Logic of Architecture*, réexamine la théorie du design à la lumière des études en intelligence artificielle et des nouveaux courants en sciences cognitives. Il propose comme approche, pour « lire » l'œuvre architecturale, de décrire le bâtiment par ses caractéristiques en mots, par du texte (*Critical Language*), et développe, par la suite, le concept de *Design World* qui permet une représentation symbolique en suivant certaines règles grammaticales. Puis il démontre qu'il est possible de créer un lien entre le langage et le design et de créer une composition graphique autour d'un concept se rapprochant de la grammaire. (Figure 35)

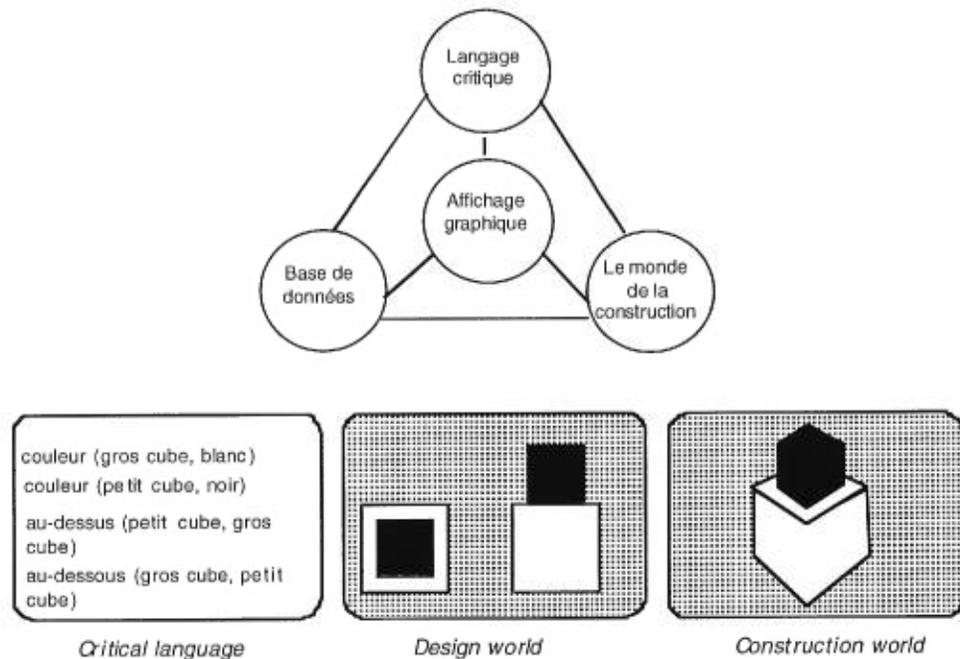


Figure 35. Modèle de référence en CAO (W. Mitchell, 1989)

¹ « Ce travail découle de la nécessité de gérer des objets incomplètement définis dans leurs dimensions, parfois leurs proportions, mais dont les positionnements relatifs sont connus en terme de relation être_sur, être_contre, être_symétrique... » (Zoller, 1996)

Ou encore J.-F. Rotgé et le GRCAO (Groupe de Recherche en Conception Assistée par Ordinateur) proposent d'utiliser une méthode de modélisation basée sur la description logique du processus de construction et la traduction informatique de ce processus. Ce qui permet de rendre le modèle totalement paramétrable. Nous pouvons ainsi produire des simulations et une interaction entre l'œil de l'architecte et la forme de l'objet : cette interaction peut s'enrichir à chaque paramétrage et se complexifier. La démarche intellectuelle peut se transmettre aussi bien à l'homme qu'à la machine. Ce moteur et processeur volumique est basé sur la géométrie projective et sur une démarche de conception/programmation.¹

Enfin, de nouvelles approches, liées à la modélisation déclarative, et développées tout particulièrement en France (L. Popova et V. Popov, 1998) basées sur l'étude d'un système de conception capable de manipuler dans un même modèleur des informations différentes, géométriques et non géométriques, permettent de justifier et de démontrer le bien fondé de passer d'une modélisation uniquement géométrique, à une modélisation plus complète, intégrant des aspects différents de la conception et selon plusieurs points de vue : structurel, fonctionnel, géométrique, sémantique, etc. Avec ce passage, on introduit une modification majeure dans la conception des outils d'aide à la conception en passant d'un système de CAO graphique à un environnement de développement générique dont le résultat est une application dédiée à un métier donné et utilisable par un concepteur.

D'autres voies telles que l'intégration de la multi-représentation et l'utilisation des *features* (Calvaire, 1996), ou les études sur la modélisation en environnement virtuel (Torguet et al., 1996), ou encore le projet « $\mu 3d$ » (Marty, 1995), nous permettent d'affirmer que depuis quelques années nous avons définitivement changé de paradigme dans l'étude de méthodes de conception assistée par ordinateur.

¹ SGDLsoft s'appuie sur le développement de nouveaux formalismes implicites et paramétriques de surfaces algébriques projectives. Les surfaces sont soumises à des contraintes projectives et contrôlées, par exemple par des points de passage, des points de contact avec des plans tangents, des points d'inflexion... SGDLsoft englobe par conséquent une équation implicite de surface ou d'hypersurface algébrique projective et des équations paramétriques correspondantes. La primitive élémentaire du système géométrique SGDLsoft est une quadrique."(SGDLsoft, 1995)

Tel que Le Moigne le souhaitait en 1986 :

«À l'initiative en particulier des architectes, les méthodes de Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O.) se développent depuis moins de dix ans, et vont se développer au point de constituer déjà une discipline quasi autonome... Une discipline au statut épistémologique des plus ambigus, tiraillée bien sûr entre diverses écoles d'informaticiens, mathématiciens, combinatoristes, optimisateurs etc. Tiraillée mais en pleine vitalité (on pourrait généraliser ceci à tous les développements contemporains de l'intelligence artificielle qui ne restent enfermés chez les informaticiens que parce que l'on fait comme si le statut épistémologique de l'informatique protégeait mieux cette trop jeune discipline). Dès lors que la recherche scientifique en architecture va convenir que "la conception est son affaire", elle conviendra vite que l'important dans C.A.O.... c'est le C... et pas le O!...: la Conception...et pas l'Ordinateur. Dès lors que l'on saura ce qu'est la conception dans tel contexte, l'intendance — et donc l'ordinateur— suivra!... » (Le Moigne, 1986, p. 101)

Le statut épistémologique de la conception par ordinateur, comme le souligne Le Moigne, est des plus ambigus et tiraillé entre diverses écoles dont celles des mathématiciens et des informaticiens. Nous sommes aujourd'hui confrontés à un tournant qui nous laisse entrevoir des changements importants de la pratique actuelle de l'architecture, des changements qui résultent d'une convergence entre l'architecture et l'informatique, tout en respectant une approche interdisciplinaire qui reflète les compétences des architectes, urbanistes, ingénieurs, informaticiens et autres acteurs dans le processus de conception.

5.1.1 Les problèmes à résoudre pour construire un langage de figuration commun

Contrairement à la planification d'un projet, le processus de design est difficile à décrire et peu compris. Il est pourtant indiscutable que la phase de conception implique un lien entre les langages de figuration des actions posées par les acteurs du projet et la forme physique. (Gero, 1987) Il a été depuis longtemps reconnu qu'une forme ne peut pas être générée simplement par un processus de logique et de déduction ou en utilisant seulement un groupe de critères tel que proposé par C. Alexander. La forme est le résultat d'un échange continu entre l'œil de l'architecte, l'image et les acteurs du processus. La solution est le résultat de ce processus complexe et interactif, au cours duquel l'idée est développée, modifiée ou abandonnée en fonction des contraintes, des besoins et d'un ensemble d'autres facteurs pendant que tout au long du processus, nous

assistons à une constante création de nouveaux buts et à la redéfinition des contraintes. (Akin, 1984)

Ces constats nous amènent à tenir compte, lors de l'explication des problèmes à résoudre pour construire un langage de figuration commun, de cette approche pour la conception que les architectes ont développée et qui est conçue en terme de *problem solving*.

Déjà R. Prost avait amorcé ces réflexions depuis 86 en soulignant que : «le problème (de la conception) n'est pas tant inhérent à la prolifération des approches et à la diversité des exigences méthodologiques, qu'à cette volonté quasi unanime d'imposer une perspective plutôt qu'une autre, à écarter une position méthodologique comme on rejeterait une «mauvaise doctrine» ou une œuvre indigne». (1986) Il ajoutera en 92 :

«...concevoir une solution architecturale impose d'introduire des références externes au problème. La relation entre un problème et une solution n'est jamais de type linéaire et bien que l'énoncé du problème soit partie intégrante du processus de conception, il ne peut le déterminer entièrement. Un énoncé de problème demeure un système ouvert, et c'est seulement dans une dynamique avec les énoncés de solution qu'il peut trouver sa cohérence et sa pertinence.» (1992, p. 31)

Finalement, l'informatique nous permet de centrer nos réflexions sur les liens entre les langages de figuration et les actions des acteurs associés au processus de conception du projet et sur les problèmes de cohérence de l'information, c'est-à-dire sur le langage à adopter pour notre communication visuelle.

Je m'insère dans ce cadre de travail convaincu que, pour transmettre, d'une façon explicite la démarche de conception soit aux acteurs du projet, soit à la machine ordinateur, nous devons proposer un nouveau langage de figuration qui englobe le processus de programmation. Selon J-F. Rotgé :

«du point de vue de la puissance de la formalisation de la pensée et de la rationalisation des procédures de modélisation, la programmation est un outil indispensable et incontournable si nous voulons, par exemple, travailler avec des opérateurs comme «enlever» ou «ajouter» de la matière et/ou positionner l'endroit où l'on effectuera cette opération. La logique et l'ordre d'exécution, de même que les contrôles de ces différentes tâches doivent être clairement spécifiées par l'intermédiaire d'une grammaire et d'un vocabulaire appropriés». (Rotgé, *SGDLsoft*, 1995)

Cette voie nous permet de nous inscrire dans une stratégie d'un langage de figuration et de programmation pour décrire le processus de modélisation, pour aider les acteurs à la conception de la forme.

5.1.2 Les approches épistémologiques à la conception assistée par ordinateur

À partir des années 60, trois attitudes fondamentales, non seulement sur la recherche en CAO mais aussi sur l'approche épistémologique, se sont succédées, ces attitudes peuvent être comparées aux approches vis-à-vis de la science. En me basant sur les différentes positions sur la recherche exposées par E. G. Guba (1994) qui explique les différentes approches épistémologiques, je peux les résumer, comme le fait M. Goodall, en les appelant première, seconde et troisième science et en les comparant à la science des Grecs, de la Renaissance, et à la science contemporaine.

Dans la science des Grecs, où Euclide est en l'occurrence l'exemple à retenir, on énonçait un certain nombre d'axiomes, de vérités à partir desquels on déduisait une série de théorèmes. Le système construit était cohérent et l'abstraction était parfaite. Cette démarche a été celle des pionniers de l'architecture moderne et de la recherche en design : les premières recherches de C. Alexander en sont un exemple. (Broadbent, 1971 ; Farel, 1991) (Figure 36)

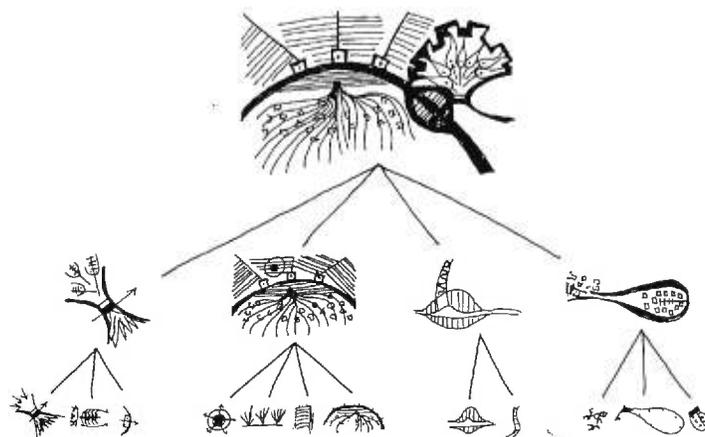


Figure 36. La décomposition du village indien de C. Alexander (hiérarchie arborescente)

Dans la science de la Renaissance, où Alberti est en l'occurrence l'exemple à retenir, tout est empirique : on observe, on questionne au moyen de l'expérience. Les axiomes doivent être confrontés à la réalité. Une hypothèse sera explicitée en termes d'images mentales basées sur notre connaissance du monde réel. (Waddington, 1970) Le but, encore aujourd'hui poursuivi par beaucoup de chercheurs, est d'observer et de vérifier des hypothèses, découvrir des modèles de prévision équivalents pour d'autres phénomènes. Cette méthode a été celle adoptée, dans les années 70, par les chercheurs en CAO. Elle devait permettre de révéler ou confirmer certains phénomènes sans nécessairement en expliquer le pourquoi : les recherches sur la boîte noire, comme celles de J.C. Jones, en sont l'exemple le plus éclairant. Selon cette approche épistémologique, pour identifier le pourquoi ou la cause la plus probable, nous formulons une série d'hypothèses sur des causes possibles et réalisons une expérience dans laquelle chacune d'elles pourra à son tour être modifiée, combinée ou éliminée. De cette façon nous pouvons déterminer la cause la plus probable du phénomène observé. (Broadbent, 1971, p. 15)

Cette méthode s'applique très bien à des objets physiques comme le bâtiment, mais quand nous devons l'appliquer à des problèmes humains tels que la conception, il devient impossible de «simplifier» ces problèmes et les résultats ne sont plus scientifiquement probants. Il est possible de formuler des hypothèses sur la conception et sur le comportement humain ou de penser en termes de stimulus-réponse (*input/output*), mais à un certain moment, cette approche devient inadéquate. Plusieurs chercheurs se sont butés à ce blocage et ils ont proposé un changement de paradigme. (Khun, 1983)

Dans la troisième science, celle contemporaine, on propose pour dépasser ce blocage d'arrêter notre démarche sur un nouveau paradigme basé sur les concepts véhiculés par la théorie des systèmes (Von Bertalanffy, 1955) et la cybernétique, en essayant de contrôler le modèle par rétroaction. Broadbent l'appelle un point de vue système/processus (1971) : «La boucle de contrôle par rétroaction est un exemple familier, et les deux disciplines (théorie des systèmes et cybernétique) sont également intéressées par la façon dont on peut construire des modèles à partir de systèmes, de manière à ce que leurs structures en tant que totalité puissent être étudiées plus en détail». (p. 15)

Cette attitude épistémologique où les acteurs du processus de conception mettent à contribution leur apport, sans se limiter au rôle d'acteurs externes, pour développer une solution architecturale est l'approche que je privilégie. Il est important dans le domaine de la conception, de comprendre qu'il est impossible de réaliser des expériences en manipulant chaque variable séparément et de séparer l'expérience de l'objet de son expérience.

Cette attitude ne cherche pas à exclure ou à renier des recherches et des efforts déployés précédemment. À ce propos, H. Petroski dans son *Cases Histories of Error and Judgment in Engineering*, nous rappelle que l'objectif premier du design et de l'étude de sa méthodologie est d'en améliorer la conception et la fiabilité et que même si C. Alexander n'a pas atteint les buts qu'il s'était proposés, il a contribué à identifier certaines causes de non réussite par les designers et à dégager une meilleure vision du problème. (1994)

Conclusion

L'architecte, nous l'avons vu, conçoit des images et les soumet à la critique. Selon les acteurs auxquels elles s'adressent, ces images contiennent une information générale donnant une vision globale du projet ou une information spécifique nécessaire à la réalisation de travaux particuliers. Il s'agit de dessins qui visent, en projetant une image de la future construction, son déploiement dans l'espace et son insertion dans le milieu physique environnant, à faciliter les choix pour le maître d'œuvre.

Comment se conjugue donc la capacité d'anticiper une organisation matérielle de l'espace, avec un processus de collaboration entre des acteurs intervenant dans une perspective artistique et technique tout au long d'un processus de décision impliquant le client, les autorités administratives et toutes les personnes qui travaillent au projet et à sa réalisation?

Comme nous l'avons déjà mentionné en parlant de conception et d'architecture, l'émergence de l'informatique comme outil d'aide à la conception a suscité un renouvellement profond dans l'exploration, sinon l'explicitation, des procédés de simulation visuelle, et le rythme accéléré des transformations liées aux outils, aux

réflexions et aux formalisations procédant de l'informatique et de la cybernétique ont imprimé un nouvel élan à cette exploration des procédés de simulation visuelle. (Ph. Boudon, 1994)

Plusieurs théoriciens de la conception (Gordon 1961 ; Osborn 1963 ; Broadbent 1966) dans les années soixante se sont penchés sur l'activité de conception de l'architecte et parmi les architectes-chercheurs, un de ceux qui se sont le plus intéressés au problème des méthodes de travail, a été C. Alexander qui publiait, déjà en 1964, ses notes pour une utilisation systématique des ordinateurs et des méthodes de design en architecture.

Alexander avait cherché à analyser les méthodes de conception des architectes en termes de problème-solution. Dans *The Synthesis of Form*, il proposait une formalisation mathématique du travail de l'architecte, selon une hiérarchisation arborescente qui décompose le *programme* de conception (1964). Mais quelque temps après (1967), il autocritique son processus et présente le *Pattern Language*, qui est une méthode d'aide à la conception. Par la suite, il peaufine encore sa position et redéfinit sa démarche méthodologique : le problème ne s'exprime pas simplement par un texte ou par une succession d'énoncés distinctifs précédant le travail de proposition des formes, mais de façon plus spécifique au travail architectural, par la mise en correspondance d'une forme et d'un contexte : concevoir des formes à structure claire qui soient bien adaptées à un contexte donné. (1971)

Depuis, d'autres chercheurs qui se penchent sur la conception architecturale ont étudié cette démarche et chacun l'a présentée à sa manière :

- un problème commence avec l'existence d'un but et le *problem-solving* est l'atteinte de ce but ; (Mitchell, 1977)
- l'architecte est mis en demeure de produire une solution ; (Lebahar, 1983)
- toute situation de conception architecturale amène une activité de résolution de problèmes ; (Conhan, 1990)
- les processus de formulation de problème en architecture sont parties intégrantes du problème de la conception. (Prost, 1992)

Quant à P. Boudon, il soulève les limites d'un modèle assimilant la conception à un processus de décision :

«La notion d'heuristique qui accompagne le plus souvent ces travaux renouvelle profondément ce qui était en jeu chez Alexander, l'assimilation sous-jacente et simultanée du processus de conception architecturale à un processus de décision restreint considérablement le champ de connaissances qu'ils permettent pourtant d'envisager. Décision se confondant alors avec conception, celle-ci est ramenée à celle-là et finit par perdre son identité et ou par redevenir la "boîte noire" dont on renonce à sonder la complexité.» (1994, p. 61)

En effet, les méthodes de travail de l'architecte ne peuvent pas être ainsi rationalisées, en les réduisant au modèle de la boîte noire ou de l'ordinateur, parce que le processus de décision s'apparente en réalité à une évaluation, une proposition visant à résoudre un problème et non pas à la solution comme telle. L'architecte procède plutôt selon une démarche par proposition d'une solution conjecturale et analyse cette conjecture afin de découvrir celles des propriétés qui sont souhaitables et celles qui ne le sont pas au vu de la situation à résoudre. (Darke, 1978)

La normalisation du traitement de l'information lors de la conception passe aussi par une remise en question du modèle informatique actuel. Et certains chercheurs essaient aujourd'hui de concilier heuristique et algorithmes dans une vision cybernétique du processus architectural. Cette approche doit tendre à concilier le rapport ordinateur-architecte et amener à traiter les symboles et le modèle avec des langages orientés objets. (Farel, 1991)

Finalement, les méthodes de travail des architectes sont liées à l'utilisation du crayon et du papier. L'architecte utilise le dessin comme un système sémiologique de simulation qui crée un rapport entre la pensée (l'idée) et l'acte graphique (Lebahar, 1983). Le dessin constitue un processus d'exploration heuristique : il met en œuvre un certain nombre de mécanismes différents dans des conditions qui semblent très dépendantes de l'expérience dont dispose le concepteur. (Conan, 1990)

L'architecte et ses collaborateurs produisent des documents dont la forme et la fonction diffèrent selon les intervenants auxquels ils s'adressent ; ces documents expriment, soit à l'aide de mots et de chiffres, soit à l'aide de symboles graphiques, les

étapes à franchir et les moyens à utiliser pour réaliser le projet. (De Paoli et Pellissier, 1992)

Nous devons rappeler aussi que pendant la conception, l'architecte n'est plus seul «*The prima donna have had their day. Now the architecety is a team*». (Caudill, 1971) Il partage son idéation avec les promoteurs du projet, pendant l'exécution du projet avec les spécialistes et enfin, ce sont les entrepreneurs qui prennent en main la réalisation du travail sous sa surveillance. (Figure 37)



Figure 37. L'architecte et les acteurs du projet

À chacune de ces étapes, l'architecte doit communiquer l'information pertinente à chacun des collaborateurs. Les méthodes pour traiter et produire l'information suivent des règles internes à chaque atelier d'architecture et ces règles vont structurer le fonctionnement du bureau. (Figure 38)

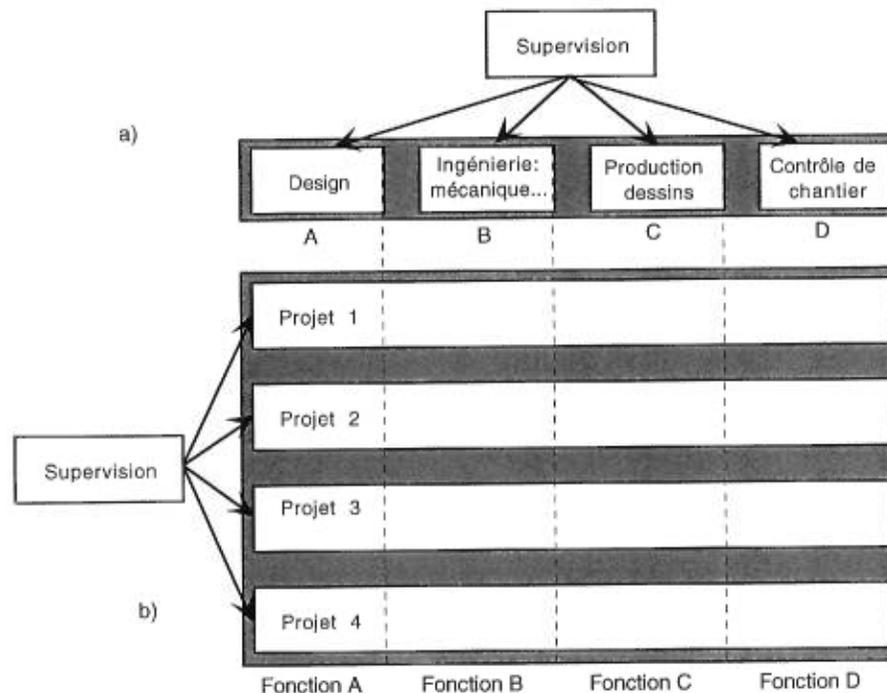


Figure 38. Modèle vertical a) et horizontal b) (Mitchell 1977)

Il est important de souligner qu'il n'y a pas de règle précise pour proposer une organisation plutôt qu'une autre : selon le type de projet et les outils de travail, le bureau est différemment structuré, mais notre intérêt est de comprendre en quoi diffère le traitement de l'information à chaque phase du projet.

L'outil de conception est, en premier lieu, un outil qui permet la réflexion. Pour cela les recherches doivent être développées vers un outil anti-synthétique et sémantique pour le développement de l'idée. En effet, la recherche de plus en plus poussée du détail et de sa précision nous empêche d'avoir la vision d'ensemble de l'objet architectural. Quelle est, par exemple, la différence entre deux lignes représentant un mur et une toiture dans la représentation graphique actuelle? En quoi ce mur diffère-t-il de cette toiture?

La thèse de Tidafi sur les moyens pour la communication en architecture avait comme objectif de «proposer une méthode alternative pour la figuration architecturale profitant des possibilités nouvelles qu'offre l'informatique». (Tidafi, 1996, p. 1) Dans sa recherche, en parlant de conception architecturale et de communication, T. Tidafi nous rappelle l'importance de la communication pour que le concepteur, tel

l'architecte, puisse parfaire l'idée par de continuelles précisions et clarifications. À cela j'ajouterais qu'il n'y a pas que l'idée de l'architecte en jeu : ce sont les idées des acteurs et somme toute de la société qui sont concrétisées par l'architecte. Et que la conception architecturale est un processus complexe qui comprend des acteurs, souvent avec des intérêts différents, qui ont le même objectif. (Prost, 1992) Il n'y a donc pas de conception, s'il n'y a pas d'objectif. L'implication des acteurs du processus de conception est donc très importante :

«Cependant, en examinant la mise à contribution des moyens disponibles pour la communication en architecture, nous avons pu constater que différentes personnes peuvent avoir des difficultés à comprendre le contenu de ces moyens. Ces personnes peuvent être tant des professionnels que des non professionnels d'un processus de conception». (Tidafi, 1996, p. 57)

Tidafi, par la modélisation des actions, nous propose une solution. Mais cette solution, la figuration de la démarche, tout en étant un moyen, n'exprime pas tous les opérateurs conceptuels. Les acteurs du projet, professionnels et non-professionnels du projet voient une image différente selon l'objectif qu'ils se sont donné. Ma préoccupation est donc d'étudier comment ces opérateurs sémantiques peuvent être encapsulés lors du processus de conception.

Pour ce faire je dirige ma recherche sur la signification et la compréhension de la conception et sur les buts et objectifs, plutôt que sur les moyens.

Ma préoccupation sera enfin de voir comment l'architecte et la profession du concepteur en architecture ont évolué selon les outils et les approches épistémologiques de la science, pour identifier les blocages qui font que l'ordinateur n'est pas encore adopté par les architectes pendant la première phase de conception de l'objet architectural. (Figure 39)

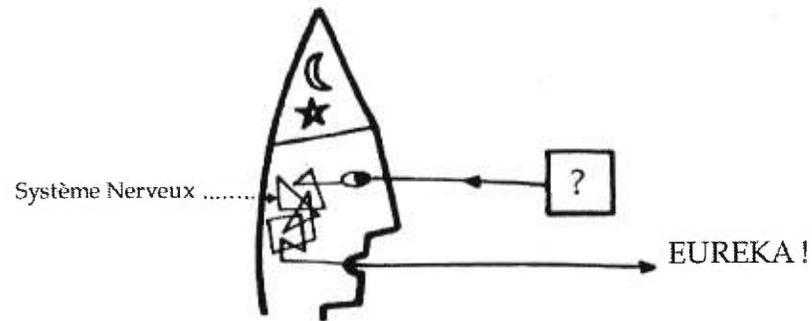


Figure 39. *The state of the Art in Design Methods* (Jones, 1970)

PARTIE II : LA COMMUNICATION ET L'OUTIL INFORMATIQUE

La réflexion sur l'architecture et plus précisément sur la conception en architecture a mis en évidence que les processus de représentation et le rôle de l'architecte ont, selon les époques et les outils de travail, changé de paradigme et que l'outil informatique peut être un élément fédérateur pour un changement des méthodes de figuration de l'œuvre architecturale. Cette réflexion nous a aussi permis de constater que les moyens de communiquer en architecture (plans, coupes ou perspectives) n'ont pas jusqu'à maintenant permis à l'architecte ou au designer de transmettre, pendant la toute première phase de conception avec l'outil ordinateur, son savoir et son savoir-faire.

Les questions abordées dans la première partie ont montré la nécessité d'identifier des blocages qui font que l'ordinateur n'est pas encore adopté par les architectes pendant la toute première phase de conception de l'objet architectural et d'explorer la manière dont l'«information» est traitée et en examinant l'action des opérateurs autres que géométriques, que j'ai appelés sémantiques.

À partir des années cinquante, l'information est définie comme un système pouvant être transmis par un signal ou une combinaison de signaux, c'est-à-dire un message. Cette définition est naturellement liée à l'évolution des médias et des outils d'information à distance. Depuis, nous assistons à la formulation de théories sur l'information et aux études sur la sémantique qui, en grec, signifie littéralement technique des signaux. Le mot sémantique a évolué par rapport à signification première pour exprimer aujourd'hui, selon le *Lexis* du Larousse, l'étude du sens ou du contenu des mots et des énoncés, par opposition à l'étude des formes : la morphologie. L'étude du développement du rôle des signes, la sémiotique, a amené plusieurs chercheurs de la seconde moitié du vingtième siècle à s'intéresser à la notion d'espace et de lieu et aussi à celle de «sémiologie urbaine» développée par Choay. (1965)

Ces deux concepts, l'information et la sémiotique des espaces et des lieux, aident à comprendre la façon dont la communication visuelle en architecture peut trouver dans l'outil informatique un moyen de dépasser l'expression actuelle des symboles graphiques par l'utilisation de maquettes procédurales qui permettent à l'architecte et aux acteurs du

processus de construction d'évoluer dans un espace de travail coopératif ou, comme le définit C. Thomas Mitchell, de *collaborative design*. (1993)

La théorie de l'information est souvent appelée théorie de la communication. Cette deuxième appellation était privilégiée par Shannon (1948) qui a proposé une première théorie mathématique de la communication en la quantifiant et dont l'unité de mesure est le *bit*. Cette vision de communication binaire a toujours été présente, depuis le début de l'évolution humaine : il suffit de rappeler les signaux de fumée des Indiens d'Amérique ou les efforts de codage de Samuel Morse pour simplifier le langage. Tandis que le langage écrit et parlé a évolué avec des symboles de plus en plus abstraits, la recherche en communication tentait de trouver une codification simple de transmission de l'information. E. Dion (1997) nous rappelle à ce propos que déjà les Grecs s'étaient intéressés à une transmission efficace de l'information à distance recherchant la simplification et l'économie du codage. Ce qui a permis de porter une attention particulière au concept de quatrième dimension, le temps et sa réversibilité, et au concept d'entropie qui en cybernétique définit le degré d'incertitude où l'on est à l'apparition de chaque signal. De la même manière, le développement du langage visuel en informatique appliquée à l'architecture et au design, après une évolution qui l'a amené à dévorer des millions, voire des gigabits et des terabits pour représenter l'objet d'un projet, se replie sur des recherches qui permettent de trouver une codification simple de transmission de l'objet : l'importance de la compréhension du signe dépasse son explication.

Étudier la communication visuelle et les outils informatiques signifie aussi s'intéresser à l'information comme moyen de réduction de l'incertitude. Comme nous le fait remarquer E. Dion, les concepts d'information et d'incertitude sont liés par leurs natures exactement contraires :

«Techniquement, l'incertitude d'un ensemble est égale au nombre de choix binaires (bits) nécessaires pour désigner un élément unique dans l'ensemble, chaque élément ayant la même probabilité d'être désigné ; et l'information mesure quant à elle l'effet du ou des choix opérés sur la quantité d'incertitude restante. Le gain d'information correspond donc exactement à la réduction d'incertitude». (1997, p. 87)

Pour mieux expliquer ce concept, l'auteur prend l'exemple d'un observateur faisant face à un ensemble de 8 cubes : pour désigner un cube il faut trois instructions binaires, ce qui signifie que l'incertitude de l'ensemble est de 3 bits. Si une information donnée

permet de sélectionner 4 cubes sur 8, alors cette information correspond à une réduction d'incertitude de 3 à 2 bits, c'est-à-dire 1 bit d'information. Cette façon de voir nous permet de montrer que l'information est un concept qui n'a de sens que dans un contexte bien précis : «celui d'un ensemble fini et probabilisé, caractérisé par un niveau d'incertitude donné». (Dion, 1997, p. 88)

Dans une démarche visant à identifier des blocages qui font que l'ordinateur n'est pas encore adopté par les architectes, ce genre de considérations met en évidence l'importance d'une recherche exploratoire préalable sur les approches en communication visuelle à l'aide de l'ordinateur et sur les concepts de programmation informatique pour traiter cette information. Une telle recherche permettra de définir le cadre théorique pour la compréhension et l'observation d'un groupe d'architectes pendant leur travail de conception avec ou sans l'outil informatique.

L'objet de cette partie de la thèse est donc de comprendre et d'expliquer les blocages entre la communication visuelle et l'utilisation de l'informatique en architecture. Je veux expliquer les problèmes à résoudre pour établir un langage commun aux acteurs du processus de conception d'un objet ou d'un bâtiment et explorer des voies de solution. Il s'agit d'une contribution à l'avancement des connaissances en architecture et en informatique rendue nécessaire pour répondre aux besoins de développement des outils informatiques en architecture.

Il s'agit d'un préalable nécessaire au développement de l'hypothèse de travail qui veut que la pleine exploitation de la relation concepteur-ordinateur va de pair avec un changement radical du langage pour la figuration.

L'enjeu scientifique de cette investigation est de montrer que l'utilisation de l'informatique comme outil de description des actions des acteurs du projet permet une nouvelle forme de traitement de l'information en architecture, c'est-à-dire une nouvelle façon de codifier l'information pour la transmettre aux destinataires. Cette démarche aidera à résoudre les problèmes de fragmentation de l'information, et favorisera une meilleure exploitation de la créativité des concepteurs lors du processus de création de l'objet architectural sans en inhiber le geste créatif. Mon objectif est de comprendre et de décrire les langages de la figuration et les méthodes de travail qui en découlent, ce qui signifie comprendre les actions des acteurs du projet et vérifier les liens entre les figurations.

Pour y parvenir nous devons identifier une série d'opérateurs des actions qui permettent d'utiliser un langage unique à tous les acteurs, c'est-à-dire proposer et vérifier une approche nouvelle de la figuration architecturale. Enfin cette recherche permet de contribuer à clarifier la problématique des langages pour la figuration et à situer l'utilisation de l'informatique en architecture.

Pour répondre à notre question de départ «comment l'architecte peut tirer parti de la CAO considérant qu'il a développé un langage et des méthodes de travail adaptés à la représentation bidimensionnelle», il fallait comprendre comment se déroule le processus de figuration architecturale et quel éclairage apporte la recherche scientifique sur l'utilisation de l'informatique en architecture. L'objectif étant d'identifier et de comprendre les blocages des architectes dans l'utilisation de la CAO, de même que les intentions de ceux qui ont développé les programmes informatiques. Nous devons réexaminer avec un nouveau regard les approches actuelles de la CAO sans, comme l'écrit Flemming (1994), tomber dans le piège qui soutient que les problèmes non techniques peuvent comporter des solutions techniques et en nous plaçant dans un paradigme où les problèmes seront réglés par une approche communicative différente.

L'avenue de recherche vers laquelle convergent les efforts actuels consiste à approfondir l'étude des langages et des méthodes de travail pour améliorer la figuration des actions des acteurs du processus de conception et pour proposer une stratégie et des méthodes à adopter pour cette même figuration architecturale. Notre recherche s'insère dans ce paradigme et tente de comprendre comment l'outil informatique peut permettre une meilleure cohésion et participation des acteurs.

Les moyens utilisés pour répondre à cette question consistent en un ensemble d'investigations sur les méthodes de travail des architectes dans les bureaux afin d'observer comment les concepteurs utilisent l'ordinateur et comment ils créent leurs règles de fonctionnement. À cette fin, j'ai mis en évidence, dans un premier temps, les variables indépendantes : le travail avec et sans l'ordinateur ; et la variable dépendante : les méthodes de travail. (Figure 40)

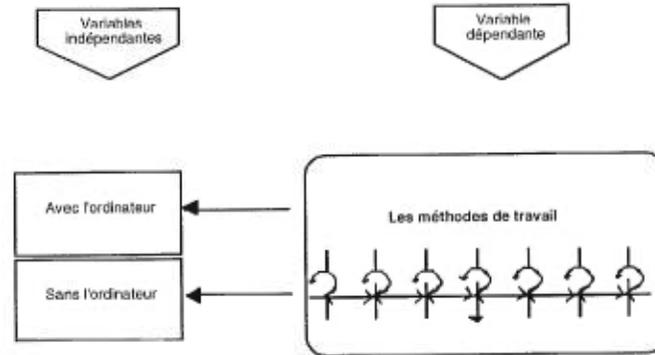


Figure 40. Les variables indépendantes et la variable dépendante

Cet examen des variables a fait ressortir la nécessité de précéder l'étude de cas par une recherche exploratoire à deux volets :

- un premier volet qui porte sur les approches en communication visuelle avec l'ordinateur ;
- un deuxième volet qui porte sur les concepts de programmation informatique.

Ces investigations sur le traitement de l'information en architecture et en informatique ont une fonction heuristique, elles servent à informer et à découvrir. Il s'agit de connaître les différents courants et d'identifier les approches les plus significatives, de même que de comprendre les idées véhiculées par les ordres professionnels et les écoles d'architecture. Le but est de donner un sens à l'information recueillie et de préparer la recherche, que je définirai comme une étude de cas, qui consiste à observer un groupe d'architectes effectuant leurs tâches de conception avec ou sans ordinateur, pour vérifier et comprendre les blocages dans l'adoption de l'informatique pendant le processus de conception.

Cette recherche exploratoire examine d'abord comment les chercheurs distinguent le rôle de la culture et de la nature dans le processus de perception de l'image et comment les langages informatiques ont évolué, pour montrer les difficultés des concepteurs dans l'utilisation de l'ordinateur, pendant la toute première phase de conception. Le but est d'arriver à une synthèse qui permette de mieux comprendre le symbole graphique et textuel, que j'appellerai figuratif, et de vérifier ces intuitions par l'étude de cas.

Chapitre 6 Communication visuelle et écran d'ordinateur

L'architecte est celui qui assure l'interface entre le client et le bâtiment et il a toujours essayé, pendant la conception, de visualiser son œuvre en temps réel. Il peut être défini comme le «système expert» qui développe la pensée du client et élabore en même temps l'audit de cette démarche à l'aide d'épures allant de l'esquisse jusqu'au projet final. L'ordinateur et la plupart des programmes de modélisation permettent une visualisation de cette démarche en temps quasi réel par une approche virtuelle pouvant aller jusqu'à la simulation d'expériences sensorielles, et par la modélisation en décrivant les objets avec leur matière et les lois physiques qui s'y rattachent. (Deshaies, 1986) Ce qui permet de constater que nous sommes souvent confrontés en CAO à la même polarité que dans la représentation graphique traditionnelle : choisir une représentation qui s'apparente au rendu, le *mapping*, ou à la modélisation. Le but de notre étude est de montrer que nous pouvons proposer une nouvelle approche de la conception et du même coup, permettre à l'outil ordinateur d'aider à comprendre et à concevoir l'objet architectural.

Selon A. Marty, les approches logicielles actuelles appliquées à la conception architecturale confortent les architectes dans l'idée que l'essentiel de leur travail réside dans la conception des espaces, et que la mise au point du dossier des pièces graphiques et écrites est le problème des dessinateurs ou techniciens qui doivent se charger d'habiller les plans, de chiffrer le projet, en attendant que l'ordinateur fasse tout cela. En réalité, le dossier des pièces graphiques et écrites est le lieu essentiel de la conception, le support de la communication des informations concernant le projet, et enfin la base de données pour réaliser l'ouvrage. C'est le lieu réel où l'architecte travaille pendant de longs moments et non pas un passage technico-administratif entre l'idée et la réalisation. C'est probablement la raison principale pour laquelle un traitement de texte, un tableur et un logiciel en 2D peuvent encore aujourd'hui convenir parfaitement pour gérer un projet d'architecture, sans demander, lors de la conception du bâtiment, une contribution active de cet outil, pourtant très puissant.

Depuis quelques années, plusieurs efforts ont permis d'intégrer les ordinateurs par le biais de la conception assistée par ordinateur pour permettre une visualisation de l'objet en temps quasi réel. (De Paoli et Marty, 1994) Ces efforts sont concentrés sur la possibilité de voir l'ordinateur comme un accélérateur au stade de la conception

davantage qu'à celui de la production pour prendre une bonne place dans la conceptualisation de l'image pensée et, au delà, dans le projet architectural. Cet outil de simulation permet d'ouvrir des horizons nouveaux aux architectes, sans rejeter les méthodes issues des siècles passés, non pour se faire les plus ardents défenseurs de quelques lignes de code informatique, mais en profitant de ce nouveau moyen pour mieux les maîtriser, les approfondir, les prolonger. (Marty, 1992)

Par le biais de l'informatique, l'architecte a modifié certaines approches du travail de conception, mais les vraies modifications restent encore à faire au stade de la phase de l'exécution du projet ou de la simulation de modèles préconçus. Ce changement s'est fait tout particulièrement :

- par les NTIC (nouvelles technologies de l'information et des communications), surtout en utilisant le concept de toile d'araignée électronique et en misant sur le transfert et la mise en commun de fichiers entre le plus grand nombre possible de logiciels et d'acteurs ;
- par un système informatique privilégiant la communication machine-utilisateur à la communication machine-machine et insistant sur l'apprentissage en profondeur des concepts de la CAO et de l'infographie pour tenter d'aboutir à une plus grande liberté par rapport à la machine.

L'approche épistémologique de cette recherche sur la perception de l'image se fonde sur la conviction que l'homme est inscrit dans une réalité indivise qu'il structure et qui le structure. (Debono, 1998) Pour mieux expliquer cette attitude, Debono nous rappelle l'importance de percevoir le réel comme source de toute connaissance :

«Bien que nous sachions aujourd'hui que ce réel est voilé (Despagnat), la naissance des concepts modernes d'espace, de forme, de force, d'inertie, de nombre ou de temps est due à des précurseurs comme le Danois, de Méharicourt, de Cues, Oresme ou Buridan. Ces maîtres seront en effet les premiers à rompre avec la mécanique aristotélicienne et à faire preuve d'un véritable esprit de créativité et de libre arbitre. En ce sens, on peut reconnaître dans leur approche celle des chercheurs niant toute fracture de la réalité, sans pour autant y voir une manifestation du tout (Debono, 1996). De fait, la plastique telle que nous la concevons, ne doit pas être assimilée à quelques vues holistiques du monde, qui mixeraient à tort et à travers les isolats de tout bord, pour servir un bouillon élastique et peu digeste sommant les parties. Il s'agit tout au contraire de décrire rigoureusement l'unité dans sa diversité, la vérité dans sa relativité, et la réalité comme un processus dans lequel je (l'acteur) me construit ici et maintenant.» (1998, p. 1)

Adopter cette approche signifie considérer les facteurs étudiés dans leur complexité, sans les séparer, pour atteindre une vision différente de l'informatique. Cela évite de détacher cette discipline de l'architecture, un peu comme le cartésianisme, souvent utile dans l'évolution technologique, qui ne peut être séparé du rêve architectural qui renferme un fantastique. Le but est de montrer qu'il est possible de rallier ceux qui créent la matière, à l'occasion les informaticiens, et ceux qui créent, les concepteurs. Il s'agit de réaliser que et l'informaticien et l'architecte font appel aux mêmes sources ou, comme le dit Debono, «à une même plage temporelle affleurant une dimension inobservable mais tout à fait concevable, à un carrefour ontologique entre les disciplines. (1996)

Il est donc important de montrer qu'une recherche sur des comportements a comme premier point de compréhension la perception de l'image et la façon dont elle se présente à l'écran.

6.1 La perception de l'image

Étudier la perception en CAO signifie comprendre ce que l'architecte voit à l'écran et derrière l'écran, c'est-à-dire voir s'il peut intervenir activement et explicitement sur les images visualisées.

Un travail très important sur la perception de l'image en architecture a été réalisé il y a quelques années par Tidafi. (1996) Il comportait deux parties : une sur la psychologie cognitive et l'imagerie mentale ; l'autre sur la psychologie de l'environnement et l'appréciation. L'objectif de la première recherche était de comprendre la façon dont une personne peut se représenter des configurations spatiales et les prendre en considération pour réaliser ses actions. La deuxième tentait de comprendre les phénomènes pouvant intervenir dans la transaction d'une personne avec son environnement physique et ensuite, d'intégrer cette compréhension pour améliorer le processus de conception de futurs environnements physiques.

Dans la première partie de son étude, Tidafi fait appel à la psychologie cognitive pour comprendre :

- «la manière dont une personne pourrait se former une représentation mentale d'une configuration spatiale ;
- la manière dont cette représentation mentale pourrait refléter une configuration spatiale perçue ;
- la manière dont une personne pourrait mettre à contribution cette représentation mentale pour la réalisation de ses actions». (1996, p. 69)

L'auteur présente les principales théories contemporaines de l'imagerie mentale, dont celles de S.M. Kosslyn, Z. Pylyshyn, G. Hinton et D. Marr, un des plus importants théoriciens contemporains de la vision. Tidafi fait remarquer que : «les opposants aux théories relatives à l'image mentale quasi perceptive alimentent le débat non pas en réfutant la totalité des concepts que ces théories mettent de l'avant, mais en soulignant plutôt leurs limites et les concepts manquants». Bien que le débat reste ouvert, les théories avancées lui permettent de dégager au moins trois aspects de la représentation mentale :

- la représentation d'une configuration spatiale pourrait reproduire d'une façon analogue ce que la personne perçoit dans le monde tangible ;
- la représentation mentale est stockée en mémoire, la *Long Term Memory*, et pourrait servir de support à la formation d'une image à caractère visuel et au raisonnement sur le contenu de l'image ;
- la personne pourrait activer cette représentation mentale sous une forme quasi-perceptive pour retrouver une information non explicitée dans ce qui est déjà stocké sous une forme littérale dans la *Long Term Memory*. (Tidafi, 1996)

Ce que nous retenons c'est que l'imagerie mentale du côté psycho-cognitif peut prendre plusieurs formes dimensionnelles (des deux dimensions à la troisième en passant, comme le soulignent les études de Kosslyn (1980), par l'esquisse 2^{1/2} de D. Marr), et que la plupart des travaux de recherche effectués plaident pour une représentation tridimensionnelle.

Dans la deuxième partie de son étude Tidafi se concentre sur le concept de perception environnementale introduit par W. Ittelson (1978) qui propose l'étude de la perception, non seulement en isolant les propriétés, comme la couleur, mais en traitant aussi le processus de perception dans sa complexité. Cette approche a permis un changement de paradigme sur le traitement de la cognition d'un environnement en permettant d'ajouter l'environnement à la cognition pour nous montrer comment

l'individu peut modifier ses choix et préférences dans des environnements physiques différents.

Après avoir démontré par ses recherches en psychologie cognitive que ces travaux permettent de comprendre la façon dont une personne peut prendre connaissance d'un univers d'objets, sur une base analogue, l'auteur montre comment la psychologie de l'environnement permet de mieux saisir comment une personne peut être influencée par l'environnement et comment ses actions dans un environnement physique donné peuvent avoir une influence sur la connaissance.

Certains auteurs soulignent que dans un environnement physique, la perception par points de vue différents est une méthode de compréhension de l'environnement. Et en même temps, R. Arnheim (1986) ajoute le caractère fonctionnel en affirmant que, en regardant un objet complexe, ou non, nous retenons rarement l'image d'une configuration spatiale, mais que nous prenons principalement connaissance de ce que nous observons à partir de nos déplacements fonctionnels. D'autres chercheurs, dont W. McGill et J.H. Korn (1982), considèrent que la perception a au moins deux fonctions : une utilitaire, l'autre esthétique. Cette deuxième est celle qui permet de fournir une connaissance sur la nature de l'environnement et c'est ce qui manque à l'ordinateur.

Il s'agit là d'un geste d'appréciation, geste qui me permet, par exemple, d'affirmer que quand nous étions petits il y avait plus de neige au sol qu'il y en a aujourd'hui, en oubliant que notre appréciation de la hauteur de la neige dépend probablement de notre grandeur physique. Cela signifie qu'une personne développe des impressions d'un environnement et que ces impressions sont indissociables de la personne. A.T. Purcell (1984) a proposé une théorie de l'appréciation basée sur une série d'expériences sur la transmission des histoires entre des personnes pour introduire le concept de schéma qui peut être comparé au canevas ou script d'une scène, une espèce d'organisation mentale et cognitive qui est comparée à d'autres parties ayant les mêmes attributs, un peu comme les *defaults values* dans les ordinateurs. (1984, p. 31) Ces théories sont particulièrement importantes pour comprendre l'appréciation que les architectes font lors de l'interprétation spatiale d'une image de conception. C'est aussi sur la base de ces considérations qu'une partie des recherches en intelligence artificielle a été développée, comme le souligne D. Crevier dans *À la recherche de l'intelligence artificielle*, en faisant remarquer que l'histoire de l'IA est aussi l'histoire des progrès lents mais décisifs de la connaissance de la pensée humaine. (Crevier, 1997)

Ces travaux de recherche tendent à montrer l'importance d'étudier la représentation spatiale que se font les acteurs pendant le processus de conception, et l'importance d'explorer les langages informatiques.

6.2 La représentation spatiale et l'écran

Le concept de représentation spatiale peut faire référence à diverses réalités. Dans le contexte de cette recherche, la représentation spatiale fait référence aux images que se fait un individu, et tout particulièrement un architecte ou un designer, du monde et des objets qu'il perçoit à l'aide d'un ordinateur et d'un écran. (Figure 41)

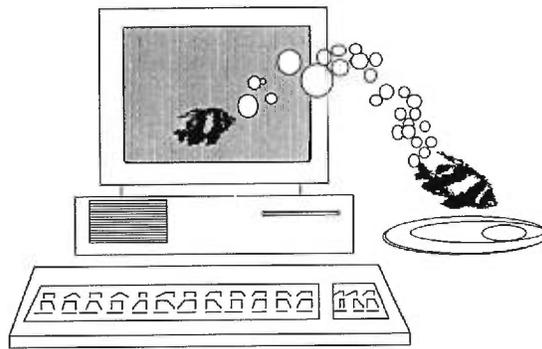


Figure 41. La représentation spatiale fait référence aux images que se fait un individu du monde et des objets qu'il perçoit à l'aide d'un ordinateur et d'un écran

Plusieurs chercheurs ont défini et redéfini la représentation spatiale. Ils vont de Piaget (1967) qui la définit comme une «réflexion mentale interne et symbolique d'une action spatiale», à Kosslyn (1984) qui parle d'«un processus d'entreposage et de traitement d'informations spatiales». Ce qui signifie que le concepteur passe d'une position purement passive d'observateur à celle totalement active d'organisateur : il passe d'une position de capteur d'images à celle d'un organisateur de l'information pour en élaborer une. À ce sujet, P. Mongeau, dans une recherche sur la perception spatiale, compare le paradigme passif à celui d'une caméra et l'actif à celui d'un ordinateur, avec centrale de traitement CPU et écran : « il y a passage d'une position où les qualités intrinsèques (caractéristiques générales et propriétés géométriques) de l'objet

déterminent grandement la représentation à une position où les qualités intrinsèques de l'objet sont pratiquement ignorées». (1989, p. 3)

Mongeau associe ces paradigmes à trois des principales approches de la représentation spatiale : l'approche gestaltique de M. Wertheimer, la génétique de Piaget et la cognitive de Kosslyn.

Ces approches peuvent aussi être interprétées et adaptées au travail du concepteur à l'écran d'ordinateur. En effet, l'architecte ou le designer peuvent avoir trois finalités lors de la démarche de conception à l'écran d'ordinateur :

- celle de capter des images, le photographe ;
- celle d'organiser des scènes, le réalisateur ;
- celle de traiter des scènes, le metteur en scène.

L'architecte choisit naturellement d'assumer selon le cas l'un ou l'autre de ces rôles, d'où l'importance de comprendre toutes ces approches et de montrer que la conception est un ensemble d'images traitées selon le cas par un photographe, un réalisateur ou un metteur en scène, dans le but de faire comprendre l'artefact architectural.

6.2.1 Le concepteur-photographe

Pour comprendre le fonctionnement du concepteur-photographe les chercheurs ont essayé d'établir un lien entre le concepteur-photographe et la théorie de la *gestalt* (de l'allemand *gestalt* qui signifie «forme»). Cette théorie est le résultat de recherches en psychologie selon lesquelles le «monde» est perçu de façon directe. C'est une théorie qui s'intéresse à la perception : l'*image* du monde extérieur qui s'imprime en nous. Nous pouvons pour ainsi dire que notre cerveau conserve ces images en mémoire et que le travail de perception en est un de re-présentation de ces images. Plusieurs psychologues et chercheurs ont participé à la formulation de cette théorie. Parmi eux, M. Wertheimer, K. Koffka et W. Köler, suivis jusqu'à aujourd'hui par bien d'autres, notamment Oppenheimer, Gibson, Lorentz et tout particulièrement R. Arnheim. (Mongeau, 1989)

R. Arnheim est parmi ceux qui ont analysé la perception visuelle et l'environnement du point de vue artistique et architectural. En 1954, l'auteur a publié les résultats de ses recherches sur *Art and Visual Perception*, qui furent revus et réédités en 1974. Dans ces textes, l'auteur introduit le concept de la perception active ou passive et du message sémantique qui est associé au modèle graphique et géométrique dans une configuration spatiale. Ce qui est d'une très grande importance comme base de connaissance pour l'étude de la perception par l'écran d'un ordinateur.

R. Arnheim rappelle que nous avons négligé la possibilité de comprendre les choses par leur sens. Le concept est séparé du précepte et nos yeux ont été réduits à des instruments d'identification et de mesure : le meilleur exemple de cette incapacité est le nombre croissant de personnes incapables de comprendre ce que les artistes ont cherché à exprimer dans leurs œuvres. (1974)

Pourtant, W. Kandisky, préoccupé par la perte de sens des images, écrivait déjà en 1912 :

«Chaque époque d'une civilisation crée un art qui lui est propre et qu'on ne verra jamais renaître. Tenter de revivifier les principes d'art des siècles écoulés ne peut que conduire à la production d'œuvres mort-nées. De même qu'il est impossible de faire revivre en nous l'esprit et les façons de sentir des anciens Grecs, les efforts tentés pour appliquer leur principes — par exemple dans le domaine de la plastique — n'aboutiront qu'à créer des formes semblables aux formes grecques. L'œuvre produite ainsi sera sans âme pour toujours. Cette imitation ressemble à celle des singes. En apparence, les mouvements du singe sont les mêmes que ceux de l'homme : le singe s'assied, tient un livre sous son nez, le feuillette d'un air grave. Mais cette mimique est dénuée de toute signification.» (1912, p. 31)

Prendre en considération les études des œuvres d'art du point de vue perceptif est très utile pour comprendre les attitudes des architectes et concepteurs sur l'adoption de l'outil ordinateur pour concevoir des formes et des archétypes. Pour reprendre les affirmations de R. Arnheim, il faut étudier cette difficulté qu'ont aujourd'hui les spectateurs à «comprendre» les œuvres d'art et, dans notre cas, étudier aussi la représentation par images sur l'écran qui est la toile d'artiste de l'architecte. Parce que c'est encore par ces modes de simulation statique, conceptuel et perceptif que le concepteur exprime son parti architectural. Kandisky dit que faire *comprendre* c'est éduquer le spectateur, l'amener à partager le point de vue de l'artiste, ce que l'architecte fait lors de sa première esquisse ou sketch. Dans un esprit de *collaborative design*, il s'agit d'amener les acteurs à se comprendre et à partager leurs points de vue.

La préoccupation de l'artiste est, en ce qui concerne les outils de communication, très proche de celle de l'architecte : il dispose d'une toile ou d'un écran et de la forme ainsi que de la couleur pour «informer» avec des images en deux dimensions qui simulent la troisième : les volumes, et parfois, la quatrième : le temps. Un carré complètement rempli de jaune, ou un carré rempli de vert ou encore un autre triangle rempli de vert et puis un carré rempli de jaune, et ainsi de suite, tous sont des êtres différents, exerçant chacun une action différente. Finalement, pour poursuivre le raisonnement de l'artiste, la forme, au sens étroit du mot, n'est pas autre chose que la délimitation d'une surface par une autre surface. C'est la définition de son caractère extérieur. Mais toute chose extérieure renferme nécessairement aussi un élément intérieur. La forme n'est que la manifestation extérieure de ce contenu (Kandisky, 1912) et sa délimitation par l'extérieur :

- «la forme considérée en tant que délimitation, sert, par cette délimitation même, à découper sur la surface un objet matériel, par conséquent, à dessiner un objet matériel sur cette surface ;
- la forme demeure abstraite, c'est-à-dire qu'elle ne représente aucun objet réel, à moins qu'elle constitue un être purement abstrait. À cette catégorie d'êtres qui, tout abstraits qu'ils soient, vivent, agissent et font sentir leur influence, appartiennent le carré, le cercle, le triangle, le losange, le trapèze et les innombrables formes de plus en plus compliquées, qui n'ont pas de nom en mathématique.

Entre ces deux limites pullulent les formes entre le matériel et l'abstrait et elles sont le trésor de l'artiste.» (1912, pp. 98-99)

Arnheim, en rappelant C. Von Ehrenfels qui donna le nom à la théorie de la *gestalt*, nous dit que la plupart des expériences démontrent que l'apparence d'un élément dépend de sa place et de sa fonction dans un ensemble de modèles, *pattern*, et que la forme est une «invention». Plusieurs des exemples présentés par Arnheim illustrent que ce qu'il appelle l'*image-making* ne naît pas d'une projection optique de l'objet représenté, mais qu'il est un équivalent rendu avec les propriétés d'un média particulier de ce qu'on observe dans l'objet : «*Visual form can be evoked by what is seen, but cannot be taken over directly from it*». (1974, p. 139) L'intérêt de ces remarques tend à renforcer la position voulant que l'écran est utilisé aujourd'hui d'une façon limitative. En effet, pour dessiner, l'utilisateur ne dispose que de peu de techniques qui tournent autour du point (qu'on appelle couramment le pixel) et la ligne ou vecteur.

Ces techniques, appelées couramment picturales ou vectorielles, demandent une précision de l'image que le concepteur en phase de conception n'a pas encore : «tout m'échappait, la tête du modèle devant moi devenait comme un nuage, vague et illimité», disait A. Giacometti en 1921, en démarrant cette lutte pour l'interprétation de la forme par ses sculptures et ses peintures avec des modèles aux surfaces évanescentes. (Arnheim, 1974) En CAO, chercher une représentation seulement dans le modèle n'est pas nécessairement la bonne approche : le simple contour d'une image est réductif parce qu'il n'existe pas en nature et, de plus, il n'est pas l'expression des propriétés physiques du matériel. Tout au plus est-il lié au style de représentation d'une culture et d'un concepteur. (Figure 42)

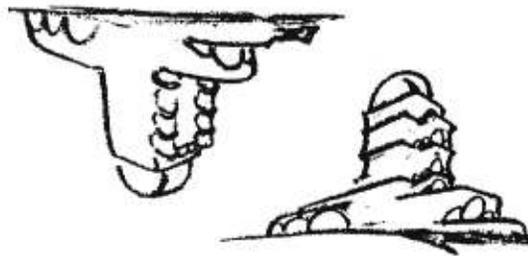


Figure 42. Le style du concepteur : esquisses de l'observatoire Einstein à Posdam par E. Mendelshon, 1920

(V. Magnago Lampugnani, 1982)

T. Tidafi avait montré que la culture et l'environnement peuvent influencer la perception. (1996) Ce qui m'amène à explorer une autre avenue de la représentation de la forme sur un écran, en cherchant à comprendre comment une série de normes et d'algorithmes qui gèrent cette représentation pourrait permettre aux concepteurs d'agir différemment l'un de l'autre. Nonobstant qu'un cube ou une sphère soient les mêmes dans tous les environnements, l'interprétation de ces formes en tant qu'objets d'un archétype doit permettre au concepteur d'agir, par les couleurs, les textures, les ombres et tous les éléments possibles qui permettent à un objet indéfini de se former.

Selon la théorie gestaltique, la perception n'est pas la collection d'éléments sensoriels, pas plus que la somme des parties. «La perception est un système dynamique d'organisation des stimuli». (Mongeau, 1989) La première prémisse de cette approche est que l'organisation des éléments perçus est directe et qu'il y a une organisation des images en groupes et puis en structure distincte du fond ; cette structure devenant la

figure, c'est-à-dire la forme et le reste de l'arrière-plan devenant le fond. Aujourd'hui, ce concept a orienté beaucoup de recherches en informatique. L'approche orientée-objet en est un exemple. Ce qui est important de souligner est que dans cette approche il n'y a pas de différence entre perception visuelle et spatiale : l'organisation des éléments obéit à des règles déjà énoncées par Wertheimer, comme les règles de la proximité, de la similarité, de la continuité et de la bonne forme, cette dernière étant une figure obéissant à la stabilité, la simplicité et la symétrie. Ou encore, comme le souligne Hochberg, l'organisation des éléments obéit à la règle, celle qui demande le moins d'information pour être formée. Cette dernière observation nous ramène aux considérations sur le décodage de l'information à l'écran et à cette «bonne forme» dont il est difficile de définir les critères.

6.2.2 Le concepteur-réalisateur de scènes

Aborder le rôle du concepteur en tant que réalisateur de scènes nous amène à discuter des études de Piaget et de Inhelder sur les opérations propositionnelles : le combinatoire et l'opérationnel. La plupart de ces théories sont le résultat d'études sur le comportement de l'enfant et de l'adolescent. À ce propos, Piaget disait que si l'enfant explique en partie l'adulte, on peut dire aussi que chaque période du développement rend compte en partie des suivantes. (Piaget et al., 1966) Ces théories trouvent un terrain propice dans la phase de conception de l'artefact parce qu'elles introduisent le concept d'approche cognitive qui est depuis quelque temps le terrain sur lequel se font les recherches en intelligence artificielle et en gestion de systèmes experts.

Piaget dit que l'intelligence repose sur la notion de niveaux d'organisation psychologique (Legendre et al., 1980) et il affirme que la représentation spatiale est directement liée à l'intelligence : la perception n'étant que, au moins partiellement, le résultat du monde sensoriel :

«Elle est limitée par les sens, lesquels, s'ils permettent de saisir directement la configuration actuelle de l'objet ou la situation, ne procurent toutefois que des images ou perceptions incomplètes et irréversibles.

La fonction symbolique, quant à elle, permet l'émergence de la représentation proprement dite grâce à l'intériorisation de l'action. Ces actions intériorisées deviennent des opérations mentales qui permettent la réversibilité logique des transformations effectuées.» (Mongeau, 1989)

Ces notions représentent pour notre étude sur le comportement du concepteur dans l'adoption de nouvelles technologies et face à l'écran d'ordinateur, un pas en avant dans la compréhension de l'adoption de l'outil. En effet, nous observons dans le travail de conception avec ou sans écran, une situation dans laquelle, après un stade perceptif de photo-image, nous avons besoin d'opérations pour poursuivre notre démarche de conception, c'est-à-dire que nous sentons le besoin d'ajouter l'opérateur au fonctionnel.

Ces opérations sont définies par Piaget comme propositionnelles. Il s'agit de créer une structure de pensée que l'image nous véhicule et de dégager les aspects logiques, ce qui signifie faire ressortir les aspects qualitatifs de l'image proposée plutôt que les quantitatifs : «le propre des opérations concrètes est de porter directement sur les objets ou sur leurs réunions (classes), leurs relations ou leur dénombrement». (Piaget, 1966, p. 105) La forme s'organise avec les contenus, les propriétés, par des représentations jugées vraies et non seulement sur la base d'hypothèses. Cette démarche combinatoire permet de raisonner non pas sur des propositions qui ne sont pas encore au stade d'une forme crédible, mais sur des vérités possibles. En architecture, nous sommes souvent confrontés à cette situation. Par exemple, lors de la conception d'une salle de spectacle, on cherche à représenter une forme qui tienne compte de propriétés comme l'«acoustique» de la salle ou la «visibilité» des spectateurs, sans pour autant intervenir au niveau métrique ou proportionnel ou encore esthétique. Cette démarche est le début de la pensée formelle ou, comme le dit Piaget, hypothético-déductive. Cette méthode est celle qui renforce l'importance fédératrice de l'outil informatique pour permettre à l'architecte et aux acteurs du processus de construction de combiner entre eux des objets ou des facteurs physiques, ou encore des idées, et de raisonner dans chaque cas sur la réalité donnée.

Cette approche renforce l'idée d'agir, dans le cas de l'écran comme outil d'aide à la conception, par l'intermédiaire d'une maquette combinatoire, un peu comme les maîtres d'œuvres agissaient jusqu'à la Renaissance. Elle permet aussi de dire que nous avons deux types d'images mentales : une figurative qui découle de la perception directe du monde et l'autre qui est le résultat de structures opératoires réversibles qui expriment le résultat de ces transformations ; processus que nous retrouvons lors de la composition des images en cinéma ou par l'architecte pendant la conception.

Cette approche qui considère l'image comme étant composée de deux entités, perceptive et opératoire, nous conforte dans l'idée que l'outil informatique peut être inséré activement pendant le processus de conception, parce que son potentiel de traitement permet cette simulation. Elle nous permet de plus de comprendre que lors de la conception, l'architecte n'a pas nécessairement besoin d'une approche dite virtuelle, c'est-à-dire de simulation spatio-temporelle hyperréaliste, mais plutôt d'un ensemble d'images qui lui permettent de chercher, comme dans un manuel d'algèbre, les opérations qui lui donnent la possibilité d'obtenir des résultats différents selon les valeurs proposées.

P. Mongeau soutient que l'évolution opératoire passe aussi par un parcours précis des niveaux géométriques, «il passe du topologique au métrique, en passant par le niveau projectif : la notion de voisinage intervenant avant les autres axiomes euclidiens, l'intuition des dimensions fondée sur l'intériorité et l'extériorité intervenant avant l'abstraction d'un volume euclidien». (1989, p. 16) Il nous propose une interprétation du schéma de développement de la représentation spatiale selon Piaget qui se présente ainsi : (Figure 43)

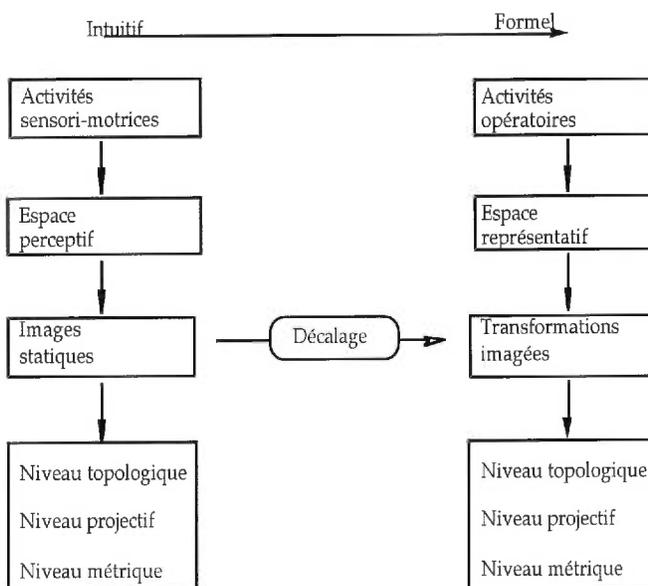


Figure 43. Schéma du développement de la représentation spatiale de Piaget (Mongeau, 1989)

Une autre notion importante de cette approche perceptive est la notion probabiliste résultant d'une assimilation du hasard par les opérations formelles.

Piaget et Inhelder nous disent en effet que pour juger par exemple de la probabilité de couple ou de trio tirés au sort dans une boîte qui comprend des boules de différentes couleurs, il faut pouvoir faire des opérations combinatoires pour tenir compte des associations et un calcul de proportions pour tenir compte des probabilités. Ce qui est souvent le processus adopté par l'architecte dans sa première phase de sketch que plusieurs chercheurs ont appelé le *Napkin system concept*. Ce concept a été repris par des chercheurs comme Lakin (A. Mc Gown, 1998) pour le développement d'un système, le *Electronic Cocktail Napkin system* qui, en adoptant la «plume et papier» comme interface, présente des possibilités de reconnaissance et d'analyse syntaxique de l'expression visuelle.

La notion probabiliste est de plus en plus présente dans les écrits sur les méthodes de conception de programmes informatiques de même que dans les préoccupations des informaticiens (Popova, 1998) et elle a souvent été l'objet de débats sur la position épistémologique à assumer. À ce propos, E. Severino, dans son traité *La Loi et le hasard*, tente par une recherche extrêmement pointue de cerner le sens spécifique que revêtent les mots «loi» et «hasard» dans le discours de la science, en remontant jusqu'à ses origines dans la pensée grecque et en analysant la pensée de R. Carnap, un des promoteurs du Cercle de Vienne, qui a cherché à formaliser le langage à partir de l'approche syntaxique des langages de Hilbert (1934). La pensée de Carnap associé aux néo-positivistes¹ dit que la série de *erlebnisse* (les expériences, les données vécues) est différente chez chaque sujet. Déjà Platon et Aristote avaient compris que les perceptions sensibles sont différentes chez chaque homme et en des temps différents de la vie cognitive de la même personne. Affirmant que la connaissance est universelle en tant qu'intellection et non en tant que sensation (l'accord entre les hommes est obtenu sur le

¹ «Si le programme d'une systématisation unitaire de la culture est déjà explicitement annoncé dans le positivisme du XIX^e siècle, l'exigence de concevoir le savoir comme savoir intersubjectif devient pleinement explicite dans le néo-positivisme, conséquemment à l'attention particulière que celui-ci porte au langage comme véhicule naturel, voire comme matériau essentiel du savoir intersubjectif... Les déficiences les plus profondes de la philosophie néo-positiviste sont déterminées par la permanence de cette attitude épistémique qui est la forme inadéquate de domination du monde, par rapport aux formes adéquates constituées par la science et l'organisation scientifico-technologique de l'existence. Les contributions authentiques du néo-positivisme sont essentiellement de matière méthodologique, elles concernent autrement dit, principalement l'utilisation "correcte" du langage. Le "principe de vérification" par exemple, est une forme de permanence de l'épistémique dans la philosophie néo-positiviste.» (Severino, 1990, pp. 92-93)

plan intellectuel et non pas sur le sensible), Severino nous rappelle les thèses fondamentales du concept de constitution :

«Le terme "objet" indique "tout ce autour de quoi peut être formulée une assertion". À chaque concept revient ainsi "son objet", autrement dit, objet et concept ne sont que deux modes linguistiques différents pour exprimer le même contenu. La "systématisation" ou "systématicité", le "système", donc, du savoir scientifique consiste en une concaténation de définitions, où tous les objets de la science sont dérivés de certains objets fondamentaux, et autrement dit, où tous les objets de la science sont ramenés à des concepts qui se réfèrent immédiatement au donné empirique. Cette dérivation-réduction, considérée dans ses caractéristiques techniques spécifiques, est appelée par Carnap *constitution*». (1990, p. 121)

E. Severino nous montre, en partant des théories chères à la culture des positivistes, que ce système de constitution consiste en une élaboration plus ou moins complexe des données empiriques : «Plus exactement, réduire un objet x à un objet y, ou "constituer" x avec y signifie transformer toutes les assertions autour de x en assertion autour de y». (1990, p. 122)

P. Mongeau nous rappelle aussi que la dissociation des espaces permet de mieux expliquer leur appropriation des propriétés géométriques. Ces considérations permettent de mieux saisir l'utilisation de tests découlant d'une approche psychométrique lors d'études des comportements. Finalement, ces théories permettent de comprendre certains gestes des acteurs en interaction avec l'architecte et en situation d'apprentissage.

La figure prend un sens «éducatif» par une série de combinaisons propositionnelles. B. Inhelder souligne que cette approche des idées et des propositions s'apparente à la logique symbolique ou algorithmique moderne qui est beaucoup plus proche du travail réel de la pensée que la pensée syllogique d'Aristote. Un des objectifs de Mongeau était justement de vérifier que : «les données topologiques étant fondamentales, elles devraient être mieux maîtrisées que les données de niveau géométrique supérieur : projectif, affine et métrique». (1989, p. 19) À ce propos, ses conclusions d'une étude sur une série de tests effectués sur 196 personnes démontrent une réussite supérieure des enfants aux items topologiques et une baisse progressive de leurs performances aux niveaux projectif et affine, ce qui se situe dans le modèle de Piaget. Par contre, la remontée des performances au niveau métrique semble en contradiction avec ce modèle.

L'auteur explique ces résultats par l'impact des programmes scolaires qui font essentiellement référence à des notions métriques. Ce qui nous permet de mieux comprendre comment la culture agit dans cette phase de conception et dans la représentation spatiale à choisir, et que le modèle présenté à l'écran doit tenir compte de la culture des acteurs. Mongeau nous dit enfin que, contrairement à l'hypothèse de travail qui supposait un affaiblissement continu des performances du topologique au métrique, nous assistons globalement à une chute significative des performances au niveau projectif et à une homogénéisation des performances entre les trois autres niveaux géométriques : topologique, affine et métrique. Il conclut en disant que ce phénomène nous porte à croire que :

«...les items projectifs semblent faire appel à des stratégies plus proprement spatiales exigeant des opérations et des transformations dans l'espace qui semblent propre au facteur «visualisation» identifié par les psychométriciens, tandis que les items des autres niveaux seraient plus «analytiques» au sens du facteur relation. Ils feraient plus appel à une capacité de «reconnaissance» des formes. De plus, ces meilleures performances observées aux niveaux métrique et affine s'expliquent peut-être en partie par la relative familiarité des figures de niveaux métrique et affine, lesquelles sont plus couramment employées tant dans les manuels scolaires que dans la vie courante.» (1989, p. 213)

Ces remarques sont très utiles lors de notre analyse sur la «visualisation» par le biais d'un écran.

6.2.3 Le concepteur-metteur en scène

Depuis une vingtaine d'années et avec le développement extrêmement rapide des technologies informatiques, les théories sur la représentation spatiale et son développement associé à l'intelligence (Piaget, 1966) ont vu naître un paradigme dans lequel le mot cognitif prend toute son importance et oriente les recherches vers la représentation spatiale. Cette théorie cognitive fut à ses débuts développée par Kosslyn (1981) et elle a été le cadre de référence de plusieurs développements en intelligence artificielle et sur le type de représentation spatiale à l'aide d'un ordinateur et d'un écran. Selon cette approche, que j'appelle du metteur en scène, l'intelligence humaine, qui était selon Piaget le facteur de développement de la perception, opère de façon semblable à celle d'un ordinateur qui peut emmagasiner et manipuler toute une série de symboles

pour organiser une scène qui est par la suite à son tour manipulée par des opérations et des transformations subséquentes pour finalement être emmagasinée non seulement comme image, mais aussi comme un ensemble d'informations sur ses parties et son apparence.

Le modèle de Kosslyn diffère de celui de Piaget dans la méthode de traitement des opérations. D'après P. Mongeau, dans le modèle de Kosslyn, les opérations postulées sont décrites selon une méthode proche de celle de l'informatique, pendant que dans le cas de Piaget, elles s'alimentent des mathématiques. Ce qui signifie que les opérations, dans le cas de Kosslyn, sont du type : recherche, rotation, balayage, translation, etc., pendant que pour Piaget, il s'agit de composition, associativité, identité, tautologie (1989). D'autres auteurs (Pelegriano, 1984) qui ont poursuivi les recherches de Kosslyn se sont intéressés aux problèmes d'encodage, de traitement de la forme et finalement, de vitesse d'exécution dans le traitement des opérations complexes de l'information emmagasinée. Pelegriano suggère aussi que, lors de tests psychométriques pour obtenir des résultats plus performants, il faudra mesurer aussi l'entraînement et non seulement les habilités innées. Cette approche tient compte de la complexité du traitement dans la quantité de l'information mais elle ne se préoccupe pas des qualités géométriques intrinsèques des images à encoder et à traiter. (Mongeau, 1989)

Il me semble opportun, en faisant référence à ce volet de la recherche sur la perception qui introduit le concept cognitif de la représentation, de rappeler le débat épistémologique sur la nature de l'objet et sa relation avec le sujet. Dans ce débat, le point de vue épistémologique amène, comme le souligne Gardner, à un projet bien ambitieux qui vise une révision du débat sur le rapport entre sciences de la nature et sciences de la culture qui pourraient «fusionner» sous un nouveau paradigme scientifique. (1985) Dans ses recherches sur l'objet comme processus et comme action, A. Semprini souligne que les sciences cognitives regroupent un ensemble très vaste d'intérêts scientifiques, d'objets de recherche différents et de traditions disciplinaires variées : psychologie de la perception, philosophie du langage, *computer science*, logique et autres encore, et surtout des projets théoriques différents sinon conflictuels. Il poursuit en disant que :

«La question est ultérieurement compliquée, à l'intérieur même du domaine des sciences cognitives par l'existence de deux courants : le cognitivisme classique et le connexionisme, qui paraissent, sur des positions mutuellement incompatibles.

Bref, la situation ne se prête guère à un bilan, ni il ne semble envisageable de parler de sciences cognitives, et encore moins du cognitivisme, comme une discipline constituée et délimitée...

Nous espérons pouvoir montrer que la conceptualisation cognitive des objets, celle au moins des cognitivistes de la première génération, propose une version naïve de la relation sujet-objet et homme-environnement et amène finalement à une impasse théorique habilement "maquillée" par une apparente crédibilité pratique. Par contre, le projet de recherche, ou plutôt les projets de recherche catalogués sous le nom collectif de connexionisme (Maturana et Varela, 1987, Varela, 1989, Anspach et Varela, 1992), nous paraissent bien plus intéressants et prometteurs quant à une effective contribution dans la modélisation de la relation de l'homme avec le monde naturel en général et son environnement objectif en particulier.» (1997, p. 98)

Pour mieux nous situer dans la compréhension des deux courants actuels, Semprini définit le paradigme cognitiviste classique à partir des trois principes définis par Andler :

- «Le complexe esprit/cerveau est susceptible d'une double description, matérielle ou physique au sens large et informationnelle ou fonctionnelle : ces deux niveaux sont largement indépendants... ;
- au niveau informationnel, le système cognitif de l'homme est caractérisé par ses états internes ou mentaux et par les processus qui conduisent d'un état au suivant. Ces états sont représentationnels : ils sont dotés d'un contenu renvoyant à des entités externes ;
- les états ou représentations internes sont des formules d'un langage interne ...proche des langages formels de la logique. Les processus sont ceux que la logique qualifie d'effectifs : ils sont principalement réductibles à un petit nombre d'opérations primitives dont l'exécution par une machine va de soi.» (1992, pp. 13-14)

À la lecture de ces principes, Semprini affirme que dans ce paradigme, la relation entre monde externe et états internes est une relation de renvoi direct, conçue selon le paradigme béhavioriste du stimulus et de la réponse à ce stimulus, ce qui signifie que les représentations se construisent comme réaction à partir d'une interaction avec l'environnement. Cette attitude est proche de la linguistique générative de Chomsky qui tend à ne pas considérer les phénomènes linguistiques qui ne sont pas maîtrisables, par exemple, en terme de grammaire. Et enfin, l'interaction avec l'environnement est effectuée en décomposant le processus en opérations élémentaires pour ramener la représentation à des structures formelles dont la réalisation matérielle est concevable. (Sperber, 1992, p. 405)

Semprini nous présente l'approche connexionniste en nous disant qu'elle est encore mal circonscrite mais qu'elle est en train de prendre forme. Cette branche des sciences cognitives rejette l'hypothèse «computationnelle» qui a été l'un des points les plus discutés du paradigme cognitif classique. Parce que selon les connexionnistes, cette approche est vouée à l'échec à cause «de ses présomptions sur une logique déductive selon laquelle tout processus externe à l'individu peut être formalisé et reproduit, après un transcodage approprié, dans un autre système, interne à l'individu» (1997, p. 105), ce qui remet en question les théories développées pour la création de la machine de Turing et donc de l'intelligence artificielle. Cette pensée s'approche des recherches sur les neurosciences et elle envisage l'activité cognitive sur le réseau neuronal où des réseaux d'unités simples et interconnectées s'échangent par propagation des stimulations. L'idée étant de faire évoluer le système global à chaque intervention.

Dans ce modèle, l'accent est mis sur le mimétisme, l'apprentissage et l'instabilité. (Vignaux, 1992, p. 328) Le système évolue par diffusion orientée des échanges internes jusqu'à atteindre un équilibre temporaire qui traduit un état d'adaptation fonctionnelle à la situation externe qu'il est censé modéliser. (Semprini, 1997) Il y a dans ce cas une vision dynamique de la cognition. Dans ce paradigme, les valeurs formelles des unités sont définies par le type de connexions et par l'équilibre qu'il a atteint à un moment donné. F. Varela donne un exemple du changement en présentant un cas en intelligence artificielle. C'est le cas d'un automate qui doit apprendre à se déplacer dans un environnement physique difficile.

Dans le cas classique, l'approche de l'intelligence artificielle essaierait de prévoir et de décrire l'ensemble des opérations que l'automate doit réaliser. Ensuite, chaque opération serait étudiée dans sa globalité. Par exemple, tourner un coin et puis segmenter l'opération pour la numériser et la transformer en calcul algorithmique. Et l'automate aurait une mémoire où sont réunies toutes ces opérations pour les utiliser le cas échéant. Les limites sont l'énorme quantité de calculs à effectuer et l'impossibilité pour l'automate de reconnaître d'autres situations, donc d'apprendre.

D'après Varela, l'approche neuromimétique procède de la même façon en empruntant une procédure par essais erreurs dans une logique de simulation de la logique évolutive. Il s'agit de créer un nombre élevé d'automates simplifiés capables d'exécuter seulement une partie du programme total, par exemple, une fonction. Et puis, une fois les opérations expérimentées on observe les interactions avec l'environnement.

Les automates qui auront répondu le mieux à certaines tâches seront par la suite dotés de possibilités d'actions plus compliquées enrichies de fonctions et de nouvelles instructions pour entreprendre une nouvelle expérience sélective. Ce qui nous fait dire que, pendant que l'automate apprend à modéliser son environnement, il s'établit une relation homme-automate qui nous permet d'apprendre de l'automate tout en lui donnant des moyens d'apprentissage.

En conclusion, ces recherches sur les finalités de l'architecte, lors de la démarche de conception, nous rapprochent du concept d'objet sémiotique et des réflexions sur le *logos* en architecture. Héraclite, à qui on attribue le premier énoncé sur la doctrine du *logos* comme loi universelle, nous dit que «*Nessuna cosa avviene per caso, ma tutto secondo «logos» e necessità*»¹. Je ne veux pas utiliser ici, comme P. Cannistraci dans son livre sur *La semiotica dell'architettura*, la pensée grecque comme point de départ, mais comme point de repère de la courbe qui représente notre civilisation occidentale pour rappeler que l'architecture, la forme, l'image semblent avoir eu un rôle beaucoup plus déterminant sur le plan sémiotique que ce que nous sommes aujourd'hui disposés à reconnaître. Ce qui signifie que, en amont de l'art de la construction, il y avait un rapport différent entre la perception et la pensée visuelle, et qu'à l'origine de notre civilisation on communiquait par images. Selon P. Canistraci (1996), cette constatation nous amène à nous ouvrir à de nouvelles recherches inédites comme les études sur la typologie de l'information, sur son caractère holistique, sur son rapport avec la pensée et le temps. Ce qui peut aussi soulever une hypothèse de travail qui supposerait que le signe naît comme projection graphique, c'est-à-dire image de l'image et que par la suite, il devient linguistique, avec un déplacement dont nous pouvons suivre le parcours.

Pour poursuivre ces considérations sur la perception, rappelons aussi les constats de T. Tidafi dans sa recherche en psychologie cognitive : «une personne peut avoir besoin de voir la structure de la forme tridimensionnelle d'une solution architecturale et que la compréhension d'une solution architecturale peut demander la préparation d'autant de figurations qu'il peut y avoir d'acteurs aux expériences et connaissances différentes qui prennent part à un processus de conception pour y ajouter une variable». (1996) Soulignons aussi les travaux de Y.-C. Gagnon dans une recherche qui visait à décortiquer et à comprendre le processus d'adoption de nouvelles technologies dans les

¹ «Aucune chose n'arrive par hasard, le tout est réglé par le logos et le besoin», de Eraclito, dans *I presocratici, Testimonianze e frammenti* (H. Diels et W. Kranz, *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Laterza, Bari, 1969)

entreprises québécoises et dont l'hypothèse de travail était que «les actes que pose le dirigeant dans l'adoption de technologies sont des actes qui répondent aux caractéristiques du comportement de l'entrepreneur». (1992) Les conclusions de son étude ethnographique nous montrent que le type d'environnement est un facteur déterminant dans l'adoption d'une nouvelle technologie.

J'ai souvent remarqué, dans mon expérience professionnelle, que lors de la présentation d'un projet avec des outils informatiques, les acteurs, s'ils ne peuvent se mouvoir autour de l'objet représenté et s'ils ne peuvent comprendre l'environnement spatial, comme dans le cas d'un objet représenté par une maquette qui reproduit à l'échelle le bâtiment, semblent manquer de liberté d'observation à plusieurs points de vue. Cette situation amène à l'incompréhension cognitive du bâtiment, ce qui signifie qu'un environnement physique peut être perçu davantage par ses attributs physiques que par sa vraie fonction. À ce propos, Purcell, dans ses recherches sur les effets de la perception environnementale, constate qu'un changement dans un environnement physique peut attirer l'œil plus que les autres caractéristiques de cet environnement. (1986) C'est-à-dire que l'on découvre un espace physique différemment selon le point de vue perspectif et que ce biais dans la perception peut entraîner des blocages s'il n'est pas contrôlé directement par le concepteur. Ce biais peut être amplifié aussi par la «culture» des acteurs du processus qui peuvent observer un modèle différemment selon leur profession (Hershberger, 1968), ou encore, par le temps d'observation d'un environnement. (Edney, 1972) Il est important de souligner que la culture ou l'expérience professionnelle peuvent engendrer des modèles mentaux différents chez les personnes et que cette situation peut être problématique si nous travaillons selon une approche de *collaborative design*.

Un des aspects qu'il faut saisir de la cognition, selon les recherches sur la perception quand on parle de conception par ordinateur, c'est de comprendre si la perception est présente d'une façon active ou passive (Gibson 1976 ; Dretske, 1990 ; Oatley, 1978 ; Cimatti, 1995) et comment, pendant la phase de conception par ordinateur, se présente la cognition spatiale. À cet effet, plusieurs études sur les représentations spatiales (Siegel, 1975 ; Pinker, 1979 ; Passini, 1990) nous rappellent que la cognition est en rapport avec la connaissance qu'une personne peut avoir de l'espace et de l'environnement physique. Dans une étude sur les habiletés spatio-cognitives des non voyants, Passini écrit que la performance des personnes complètement aveugles suggère que les compétences spatio-cognitives peuvent être

acquises sans vision et sans un schéma visuel, (1990) que la vision tend à augmenter les performances et que la raison en est qu'elle est perceptive et non cognitive.

Les dernières recherches dans le domaine de la psychologie expérimentale nous amènent à réviser les grandes traditions philosophiques en faisant ressortir les caractéristiques significatives de la perception. Ces recherches soutiennent qu'il y a une vision simple, pré-épistémique et indépendante des autres processus. (Cimatti, Pessa, Pierantoni, Meini, Paternoster, Albertazzi, Zalla, 1997) De ces travaux, on conclut que la perception n'est pas interprétation mais un ensemble de relations qui définissent le passage du simple au complexe. Ces conclusions vont dans le même sens que certaines impressions que nous avons de la conception par ordinateur : l'architecte travaille continuellement en transférant la «perception» de l'image au cerveau et du cerveau à l'image, en peaufinant chaque fois le modèle et pour cela, il n'a pas besoin au départ d'une maquette de simulation totalement définie, mais plutôt d'un modèle qui représente certaines propriétés du bâtiment pour la compréhension de la conception, propriétés qu'il enrichira au fur et à mesure que les acteurs du processus de conception y ajouteront leur perception et leurs besoins.

6.3 La théorie sémiotique du visible

Je viens de montrer par ces investigations sur la perception que la perception d'un objet n'est pas simplement passive mais qu'elle demande une médiation cognitive, et de ce fait même déjà à ce niveau, que la médiation est active et qu'elle peut être sensorielle ou cognitive. Dans cette perspective, l'individuation d'un objet, avant même de le reconnaître comme objet, est un processus actif de la pensée qui va de la pensée au monde et non le contraire. (Dretske, 1990) Ce qui, comme je viens de le souligner, nous fait dire que lors de la phase de conception, l'architecte travaille d'une façon itérative avec des modèles non détaillés qui l'inspirent, et qu'un travail avec des images trop précises et définies pourrait créer des blocages dans l'utilisation du modèle par ordinateur. À propos de cette démarche induction-déduction, il est intéressant de rappeler que R. Bacon, dans ses remarques sur les définitions de l'observation et de l'expérience, disait déjà : «l'observation et l'expérience pour amasser les matériaux, l'induction et la déduction pour les élaborer : voilà les seules bonnes machines intellectuelles». (Bernard, 1865) Il est aussi intéressant de se souvenir que l'architecte, dans ce modèle sémiotique, ne se limite pas à enregistrer fidèlement ce qui existe à

l'extérieur, ce que T. Tidafi appelle l'environnement physique, mais qu'en réalité, selon sa culture, il interprète construit et élabore les informations qui lui viennent de l'extérieur, ainsi que les sensations pour produire, comme résultat, une perception. (Cimatti, 1997)

Épicure (341-270 av. J.-C.), dans ses lettres à Hérodote, dit que la vision, le voir, est un processus dans lequel nous voyons les formes des choses, des objets desquels se détachent des «simulacres», un peu comme des images évanescentes qui gardent la trace de la forme, de la couleur, des proportions et des autres caractéristiques des lieux d'où elles proviennent pour être enregistrées dans la pensée de l'acteur qui les observe. Ces «enregistrements» donnent la vision de l'objet dans son unité et dans sa continuité et ils conservent la correspondance avec l'objet duquel ils proviennent par leurs propriétés qu'Épicure présente comme ayant leurs «racines dans la vibration des atomes qui est dans la profondeur du corps solide».

Ce rappel des propos d'Épicure renvoie aussi à la perception qui peut être considérée comme figurative, en ce sens qu'elle n'est pas seulement l'image, le «simulacre», mais aussi la matière et que cette description des propriétés est le moyen de proposer une maquette du modèle qui ne prête pas à ambiguïté, par la modification cognitive ou environnementale pour que la «culture de acteurs» ne soit pas un blocage dans l'adoption de l'outil informatique. Finalement, le visible n'apparaît pas au regard du concepteur comme quelque chose d'évident et certain, mais plutôt comme les mots d'un langage méconnu dont les significations nous sont totalement inconnues et que nous devons de ce fait interpréter et construire. (Cimatti, 1997)

Lors de la conception, il n'y a pas de cause à effet entre l'image et l'objet, mais une situation que je définirai de casual-probabiliste entre le modèle et sa perception ; une situation qui s'apparente à ce que Descartes appelait déjà une «sensation». Par exemple, selon Descartes, dans son explication des actions et de la façon dont elles excitent nos sentiments et dont nous faisons la relations entre les objets et les actions, l'action sert seulement comme simple amorceur pour un appareil cognitif qui a la fonction de produire des hypothèses à partir de quelques informations sommaires. (1649)

Le pas suivant dans cette direction pour aboutir à une théorie sémiotique du visible consiste en la pleine «sémiotisation» du visible. Pour nous expliquer les

fondements de cette théorie, Cimatti nous rappelle des études de Descartes, et tout particulièrement les premières pages de son *Traité de la lumière* (1664), qui traitent des paroles et de leur signification, qui ne sont qu'une convention. Cimatti dit que le lien qui se crée entre les objets du monde visible et leur représentation à l'intérieur de notre cerveau est semblable à la représentation, totalement arbitraire, qui lie les mots d'une langue à ses significations : ni le «chien» ni le «dog» ni le «cane» n'aboie. Le visible comme la sémantique n'est pas dans l'image, mais dans la tête du sujet.

Mais si la signification des mots n'a pas de lien naturel avec l'objet, nous devons admettre qu'il s'agit d'une convention que la langue s'est donnée au fil du temps. Nous pouvons lire les sentiments à travers des représentations symboliques et nous pouvons lire les représentations avec tous les biais d'interprétation qu'un symbole peut comporter. Le bonheur ou le malheur peuvent être lus à travers le rire et les pleurs, mais en même temps, ces manifestations en sont une représentation ambiguë. Il s'agit donc de dire que ces extensions symboliques ne sont que des indications, des signalisations polysémiques et ambiguës parce que nous ne connaissons pas clairement les codes du visible ; ce qui pourrait vouloir dire que le voir est finalement un processus incertain plein de doutes et d'hésitations.

Prenons par exemple le cube de Necker. (Gregory, 1990) Si nous observons ce cube, le cercle peut, selon le regard, appartenir au carré en premier plan, comme si l'on regardait du bas, ou à celui en second plan, comme si on regardait du haut. Cette image est par conséquent ambiguë. (Figure 44)

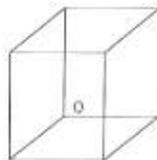


Figure 44. Le cube de Necker

Selon Dretske, cette image est le résultat d'un processus d'interprétation qui ne nous permet pas d'arriver à une interprétation définitive. Cette affirmation est par la suite complétée par Gregory qui dit que l'impossibilité d'arriver à une interprétation définitive de cette image est un exemple de la façon dont nos yeux explorent le monde des objets, selon un processus actif et structuré. Nous nous retrouvons face à la même

problématique qui est décrite par Markus (1972) lors de l'analyse des méthodes de travail en conception et tout particulièrement en architecture :

hypothèse1>vérification1>hypothèse2>vérification2...

Maintenant, si nous observons mieux ce cube et si nous le regardons avec l'œil du concepteur, nous pouvons montrer que l'ambiguïté de l'interprétation est causée par le manque d'information : il n'y a pas d'ombre, il est hors de tout contexte et surtout, nous n'avons aucune information sur la matière. De son côté, Cimatti nous propose son bonhomme qu'il appelle «l'omino di Cimatti». (Figure 45)

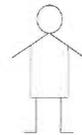


Figure 45. «l'omino di Cimatti»

Ce bonhomme, dit-il, peut être interprété comme la représentation d'un homme, d'un enfant ou encore, nonobstant son nom (bonhomme), d'une femme. Ce qui ne signifie pas que la figure est ambiguë. De nouveau, elle manque d'information. Un des blocages que cette démonstration nous amène à mettre en évidence est que nous sommes confrontés, comme dans les courants actuels sur la sémiotique et la perception, à la question de savoir si nous voyons ce que nous pensons ou si nous pensons après avoir vu. Cette interrogation rappelle encore une fois la boîte noire de Jones (1970) et ses recherches sur le processus de conception, et elle nous rappelle en même temps la difficulté de l'architecte à adopter les outils informatiques dans ses activités de concepteur.

Ce survol de la théorie sémiotique du visible veut mettre en évidence la problématique du concepteur et le blocage éventuel dans sa prise de décision lors de son interaction avec la machine. Nous nous trouvons devant l'impasse qui nous empêche de savoir quelle doit être l'information à traiter avec l'ordinateur pour représenter le modèle. Ce qui m'amène à introduire une discussion sur le sens monosémique ou polysémique de la représentation. En fait, il me semble important de saisir si le modèle représenté sur un écran illustre l'artefact à concevoir ou l'artefact conçu.

Les peintres de la Renaissance italienne comme Michel-Ange (1545) et Raphaël (1528) avaient essayé de dépasser cette dualité. A. Singer, dans une proposition théorique sur le voir, dit que l'idée platonicienne selon laquelle le voir et le penser sont incommensurables persiste dans la tendance de ce tournant de siècle où l'on tend à assimiler l'esthétique à l'expérience sensorielle, dont la pensée qui juge ne peut qu'être exclue. Les raisons de cette forte persistance de la distinction entre voir et penser sont intimement associées à la critique que les postmodernes ont fait de la raison illuministe. (Singer, 1997)

Singer nous rappelle, pour appuyer sa thèse, *Les Muses* de Nancy (1996), œuvre dans laquelle l'artiste simplifie la problématique d'un retour au dualisme platonicien en se référant spécifiquement à la pensée hégélienne selon laquelle la naissance de l'art coïncide avec le désir de rendre la divinité sensiblement visible. Cette idée est importante chez Nancy parce qu'elle souligne une tension vitale entre l'aspect productif de l'art, la *techné* et l'excès spirituel rendu visible. Pour expliquer cette position concrètement, Singer prend le cas de *La Conversion de Saint-Paul* du Caravage (1600) à *Santa Maria del Popolo*. (Figure 46) Il rappelle que cette peinture montre la double signification de la conversion : de la même façon qu'il met en discussion cette exclusion entre le voir et le penser, Caravage met en discussion la réciproque exclusion du *techné* et du sublime. Il fait remarquer comment le raccourci dans cette peinture nous rappelle que nous sommes confrontés à choisir notre point de vue sur l'«action» comme choix entre forme et esprit. Mais il est encore plus important d'observer que, étant donné que la vision du choix entre forme et esprit qui nous est offerte ici est une variable de la «contextualisation» de forme et esprit, la peinture devient condition d'une fondamentale auto-reconnaissance : le fait d'être nous-mêmes premièrement des sujets de choix.



Figure 46. La Conversion de Saint-Paul du Caravage (1600)

Les signes, pour être représentés comme signes de communication, doivent avoir un code de description qui permette à l'acteur de «lire» et d'être, comme le dit Singer, eux-mêmes des sujets de choix pour permettre une totale conceptualisation de forme et esprit.

6.3.1 Voir et penser sont-ils vraiment distincts?

«La perception est une connaissance des objets résultant d'un contact direct avec eux et la représentation consiste soit à évoquer les objets en leur absence, soit, lorsqu'elle double la perception en leur présence, à compléter leur connaissance perceptive en se référant à d'autres objets non actuellement perçus». (Piaget et Inhelder, 1972) Cette prémisse de J. Piaget, met en évidence l'importance d'une réflexion sur la distinction entre la représentation et la perception.

Cette distinction est importante, tout particulièrement lorsqu'on parle de conception assistée par ordinateur parce que «Le dessin d'architecte est bien l'évocation projective d'un objet futur, donc «absent». Il est aussi l'évocation d'objets passés, non

«actuellement présents», quand il exprime d'anciennes solutions qui sont réintroduites dans le projet en cours d'établissement». (Lebahar, 1983, p. 23)

Il s'agit de voir comment l'observateur, par exemple celui qui regarde l'image d'un bâtiment sur un écran d'ordinateur, réagit devant ce modèle que nous voulons modifiable d'une façon itérative.

Si nous voulons comprendre les programmes de CAO, nous devons être attentifs à la relation entre signifié (c'est-à-dire ce que l'on veut expliquer) par rapport au signifiant (c'est-à-dire le moyen d'expression que l'on utilise à cette fin). La représentation de l'image par ordinateur étant le signifiant : une maquette toujours modifiable qui est l'objet du projet. Et ce projet, ce dessin, est la finalité du processus en architecture. (Schön, 1982 ; Alexander, 1964)

Il s'agit donc de comprendre, en évitant d'établir un rapport de causalité entre le signifié et le signifiant. Il est clair qu'il est extrêmement difficile, voire impossible d'expliquer le fonctionnement de la boîte noire en architecture, qui rappelle aussi le modèle fondateur en communication. (Figure 47)



Figure 47. La boîte noire

De toute façon, il y a là une méthode réductrice de la conception quand, au contraire, en architecture nous sommes confrontés à la complexité. Ce que je veux chercher à comprendre ce sont les points de contrôle de cette complexité. Ces points de contrôle que je peux aussi appeler des apôles.

La représentation est donc au centre du problème. Et pour donner à l'ordinateur les allures de notre monde naturel, nous faisons appel à la représentation iconique. «Dans celle-ci, le représenté et le représentant se correspondent par des attributs qu'ils ont naturellement en commun. Par exemple, le dessin sur la paroi de la grotte et le bison, le graphisme sur l'écran de l'ordinateur et le dossier physique, ont des attributs de formes visuelles communs». (Cadoz, 1994, p. 77)

L'ordinateur, en plus de la représentation classique, c'est-à-dire de l'image, permet une interaction (même si elle est actuellement encore très élémentaire) avec son utilisateur, ce qui permet de créer des modèles de la réalité qui ne sont plus passifs. Le concepteur peut dialoguer avec la machine : elle devient un moyen d'expression de l'intelligence et du jugement de l'architecte.

À ce propos, J.-C. Lebahar, dans son livre sur le dessin d'architecte, fait cette analyse séquentielle du processus de conception :

- 1) «le diagnostic architectural : après avoir écouté le client, vu les lieux, analysé les contraintes, l'architecte fait un premier dessin qui est la représentation du problème et il sera la base graphique de la simulation ;
- 2) la recherche du dessin par simulation graphique. Quel est le rapport qui s'établit entre la pensée et l'acte graphique? Le dessin est un système sémiologique de simulation. L'architecte peut changer tout avant qu'il ne soit réalisé. C'est la fonction de tout signe symbole ;
- 3) le modèle de construction. L'architecte s'adapte aux données du problème architectural et les transforme. C'est la dialectique «sujet/objet.» (1983, p. 21)

Créer un modèle est la dernière étape avant la réalisation et elle est le résultat des acquis du concepteur, c'est-à-dire une nouvelle forme de connaissance. Nous pouvons affirmer que «toute forme de représentation qui permet d'atteindre les mêmes phénomènes avec une plus grande économie est une connaissance». (Cadoz, 1994, p. 96)

La conception assistée par ordinateur permet de percevoir un modèle qui est fictif et qui n'a pas un original réel. Elle permet de dessiner et de représenter des objets avant qu'ils n'existent. Si le concepteur ou l'observateur en sont satisfaits, alors on les réalise : nous assistons au paradoxe dans lequel, dans ce retour au réel, la réalité représente le fictif.

Devant ce risque de confusion entre le réel et le fictif, les opérateurs sémantiques et géométriques peuvent permettre une nouvelle approche de représentation de l'image qui soit capable de représenter le *hard* (monde physique) et le *soft* (monde mental), avec toutes ses contraintes.

6.4 Les icônes, symboles de communication en CAO

Chaque fois que nous faisons une étude sémantique du langage des signes graphiques, nous sommes confrontés au manque de conformité et de cohérence ainsi qu'à l'ambiguïté dans l'utilisation des termes : les pictogrammes, les signes, les signes graphiques, les symboles, les icônes ou encore les icônes symboliques et les symboles iconographiques.

Selon U. Eco, Peirce distingue les symboles en rapport arbitraire avec leur objet, les icônes, en rapport de similarité avec leur objet et les indices, en rapport physique avec leur objet. (1992, p. 11) Cette distinction, même si elle ne doit pas être interprétée comme une classification, parce que dans cette triade il y a une continuelle réciprocity, sert de référence universelle depuis plusieurs années. Eco nous montre comment les catégories d'icônes et d'indices sont des catégories «passe-partout» qui fonctionnent justement de par leur caractère vague.

Dans un travail sur la problématique des mécanismes graphiques de communication, J.-F. Rotgé (1991) présente une analyse de ces notions et il nous rappelle que le terme icône est issu du grec, que sa traduction la plus courante est le mot image, et que dans le domaine de l'informatique, ce terme est transformé sous la forme d'un néologisme informatique *Icon* dont la signification est «figure conventionnelle représentant quelque chose». En poursuivant sa recherche sur le terme icône, J.-F. Rotgé nous rappelle que M. Cartier réserve, dans son livre *La grammaire iconique*, un chapitre aux problèmes de définition dans le contexte de la communication informatisée. Le mot icône est très souvent associé au mot code sous la forme de code iconique : on trouve les codes iconiques parmi les nombreux codes des signes de communication. Ces codes répondent aux règles de la communication visuelle et sont des systèmes de schématisation de l'information. (Cartier, 1991) Dans le cas des signes, P. Guiraud (1969) souligne dans *La sémantique* que les signes artificiels se distinguent des naturels par le fait que les premiers sont des signes conventionnels, des symboles, pendant que les autres sont des reproductions, des caractères naturels de la réalité, des images ou icônes. Il souligne toutefois que la terminologie n'est malheureusement pas fixée et que le mot symbole est pris dans les sens les plus divers selon les auteurs.

Selon les étymologistes, le terme «symbole» vient du grec *symbolon* qui était un objet d'argile brisé en deux morceaux par le patron de la maison à la fin du séjour d'un

étranger et dont chacun gardait une moitié. Transmises de génération en génération, à une époque où les voyages étaient rares et difficiles et les communications limitées, les deux parties recollées permettaient de fournir la preuve des relations d'hospitalité qui avaient été établies dans le passé par les deux familles. Par analogie, nous appelons symbole tout ce qui désigne une autre entité, spécialement abstraite, selon une correspondance logique. (Ganascia, 1997)

Rotgé laissera tomber le terme icône parce qu'on le confond avec un néologisme informatique et il utilisera par contre le terme symbole graphique qui semble parfaitement adopté dans le domaine des grammaires formelles. Cette approche de l'outil, si utile soit-elle en informatique, tend à ne pas prendre en considération l'acteur, le concepteur, pour se concentrer sur le décodeur et le code. Dans une approche qui veut dépasser le dualisme entre le voir et le penser, nous devons tenir compte et de l'image et du code, ou du texte qui décrit l'image. Finalement, le code représente l'information et le symbole l'image, ce que déjà P. Boudon avait défini comme figuration : «analyser la figuration demande, certes, de s'intéresser à la production des figures, à leur tracé, mais aussi aux conditions dans lesquelles s'effectue le tracé et qui le rendent possible». (1988, p. 17) Pour réduire les ambiguïtés, je parlerai de symbole figuratif plutôt que graphique, en espérant ne pas ajouter un néologisme, dans le but de mieux présenter mon champ d'investigation : l'étude des images et des mots qui produisent la figuration dans un environnement informatique.

Précisons qu'il est difficile de classer les symboles graphiques en fonction de leur nature figurative. Si on compare le symbole graphique à l'écriture, on remarque que nous utilisons souvent le terme figuratif pour décrire une stylisation, le pictogramme, et que les sémantiques parlent d'évolution du figuratif à l'abstrait par l'écriture et donc vers l'idéogramme. (Jean, 1987) Selon G. Jean, les premières manifestations de l'écriture sont des dessins simplifiés et stylisés, et la combinaison de ces pictogrammes peut exprimer une idée, d'où le terme idéogramme.

À ce propos, selon l'architecte peintre WenPin Shang (1999), la langue chinoise n'a pas voulu abandonner l'idéogramme (Figure 48) et elle l'a complété abstraitement par le langage plutôt que par des symboles non significatifs : l'écriture est dans la peinture chinoise partie intégrante du processus de représentation et le texte s'entremêle au dessin.



Figure 48. Exemple d'idéogramme chinois : le mot maison, représentant le contenu sémantique en même temps que la réalité physique

Ce qui signifie que le résultat d'une figuration est une maquette qui est un ensemble de symboles figuratifs qui sera procédural, où le mot procédural représente l'ensemble de règles, des formalités, des actes qui doivent être accomplis pour parvenir à un modèle de simulation. Cette méthode de résolution ordonnée est une action et comme telle, elle s'apparente à ce qu'Épicure avait déjà décrit en parlant des «simulacres» qui se détachent de l'objet pour représenter les atomes.

À ce propos dans la *Production des signes*, Eco adopte comme base théorique de discussion le modèle proposé par Hjelmslev (1968) :

«Selon ce modèle, on définit comme matière de l'expression tout continu amorphe auquel un système sémiotique déterminé donne forme en découpant des éléments pertinents et structurés et en les produisant ensuite comme substance ; et l'on définit comme matière du contenu l'univers en tant que champ de l'expérience auquel une culture déterminée donne forme en découpant des éléments pertinents et structurés et en les communiquant ensuite comme substance. La différence entre un élément de la forme et un élément de la substance est celle qui intervient entre un type et une occurrence concrète.» (1992, p. 12)

Par là, Eco nous montre qu'une fonction sémiotique est employée pour référer à des états du monde possible plutôt qu'à des états du monde réel et qu'il faut reformuler

les concepts entourant la définition des signes iconiques et en arriver à formuler une nouvelle typologie des modes de production des signes.

Les recherches sur la modélisation volumique avaient jusqu'à tout récemment pour but de créer des formes géométriques synthétiques par ordinateur avec un niveau de réalisme plus ou moins sophistiqué. Dans cette modélisation volumique, le langage avait la fonction d'outil de conception et la modélisation géométrique était la description mathématique de primitives ou de formes géométriques de base. Cette approche a permis de développer la fabrication assistée par ordinateur, mais n'a pas, par contre, réussi à séduire les concepteurs architectes ou designers parce que le travail du concepteur n'est pas seulement un travail de reproduction de l'objet. Cette approche par des formes géométriques synthétiques est utile pour la reconstitution de bâtiments ou de modèles existants ou pour l'étude conceptuelle des formes, mais elle est difficile à maîtriser lors des premières phases de conception parce que, comme nous l'avons déjà mentionné, les actions en architecture sont liées à la perception et elles ne sont pas définitives : il s'agit d'actions «ouvertes» c'est-à-dire non définitives et dans un esprit évolutif toujours perfectible.

Ce qui signifie que reproduire toutes les propriétés du modèle, selon des règles d'assemblage et de construction prédéterminées, n'est pas un travail de conception, mais plutôt de montage, et que la figuration infographique doit être conçue différemment de sa forme actuelle. Si nous devons réaliser une sphère, nous pouvons la reproduire par ses caractéristiques géométriques, ce qui signifie une création ponctuelle par des primitives. C'est-à-dire créer un double, une copie. Mais si je déplace la sphère, j'introduis des qualités fonctionnelles que je dois prendre en ligne de compte : friction, déplacement dans le temps et dans l'espace. Donc, si je dois produire une balle de soccer, ce qui m'intéressera sera, par exemple, l'adhérence et le poids. Ce qui m'amène à représenter la sphère non par la perfection de la forme mais par les propriétés de l'objet, et plus le nombre des propriétés est grand, plus cette reproduction sera difficile et complexe parce que plusieurs des lois qui régissent la fabrication de l'artefact nous sont inconnues, contrairement aux opérateurs géométriques. U. Eco nous rappelle que chaque fois que nous produisons une réplique, nous sommes confrontés au problème du *ratio facilis* et *ratio difficilis* : «chaque réplique est une occurrence qui concorde avec son propre type. Une réplique constitue le cas le plus simple de rapport entre type et occurrence». (1992, p. 23)

Eco rappelle aussi que lors de la production du modèle, nous devons également approcher avec circonspection la recherche de similitude : que signifie être semblable? Est-ce que le papier aluminium utilisé dans les maquettes pour reproduire une cascade est fait d'eau? Où sont-ce les stimuli qu'il procure qui nous permettent de déclencher une perception semblable à celle de la cascade réelle? Ce qui signifie que nous devons reproduire des propriétés qui n'ont pas le même état physique que l'objet, mais que ces propriétés doivent mettre en œuvre une structure perceptive «semblable» à celle qui est déclenchée par l'objet réel.

Ces réflexions nous amènent à dire que la figuration infographique, pour qu'elle soit une «invention», c'est-à-dire une production de quelque chose à partir de quelque chose d'autre qui n'a pas encore été définie, doit comprendre les propriétés de l'objet. Et nous devons investiguer la façon dont ces propriétés doivent être traitées dans la figuration par l'ordinateur. En effet, nous sommes dans une situation de traitement complexe des informations (et de plusieurs informations en même temps) où l'approche linéaire ou arborescente de résolution de problèmes ne convient pas.

6.4.1 Les outils pour inventer

Jusqu'à présent, nous avons vu que, en conception, il s'agit de définir quelque chose qui est transformé à partir de quelque chose d'autre qui n'a pas encore été défini. Et à ce propos, U. Eco, en parlant de l'invention comme institution de code, affirme que «ce mode de production nous place devant le cas d'une convention signifiante ÉTABLIE en même temps que les [...] fonctifs¹ sont INVENTÉS». (1992, p. 104) Il affirme que la difficulté soulevée par les formes d'invention classées comme inventions et régies par le ratio *difficilis* pose le problème d'institution de code, ce qui nous permet de formuler un processus qui va du modèle perceptif au sémantique. (Figure 49)

¹ Fonctifs : fonctions rendant effectif un processus de signification

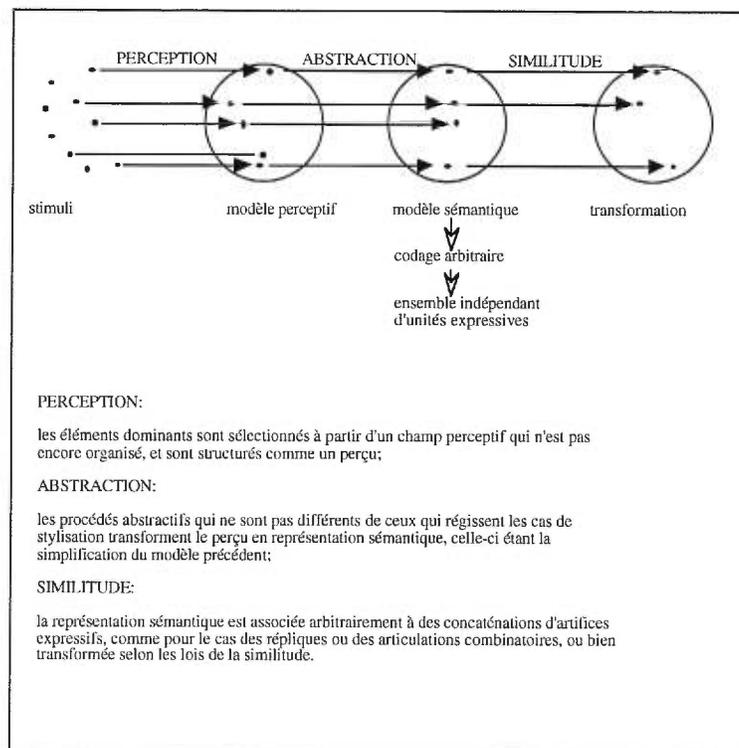


Figure 49. Formulation d'un processus qui va du modèle perceptif au sémantique (U. Eco, 1992)

Le modèle représenté par Eco présente les types de production sémiotique analysés dans le modèle de Hjelmslev qui lui avait permis de créer une classification à quatre dimensions des modes de production sémiotique :

- le travail physique nécessaire à la production de l'expression ;
- le rapport type-occurrence (*ratio facilis* ou *ratio difficilis*) ;
- le continuum à former homomatériel (l'expression est formée de la même matière que le référent, soit éthéromatériel ; (le continuum peut être choisi arbitrairement s'il n'est pas motivé par un lien causal avec le référent) ;
- le mode d'articulation et sa complexité qui vient des systèmes où des unités sont déterminées.

Mais ces procédés de production sémiotique, tout en étant très explicites quant au processus, ne comprennent pas encore ce que nous avons appelé l'invention. Toujours selon Eco, l'invention nécessite deux types de procédés qu'il définit comme modéré et radical.

Dans le procédé modéré, nous avons la projection d'une représentation sur un continuum expressif où l'on obtient une forme de l'expression qui fixe les règles de production de l'unité de contenu d'une représentation perceptive (Figure 50). Dans ce cas «l'émetteur présuppose des règles de corrélation là où le fonctif du contenu n'existe pas encore. Mais aux yeux du destinataire, le résultat n'est encore qu'un simple artifice expressif». (1992, p. 107)

Dans le deuxième cas, celui des inventions radicales, nous avons un dépassement du modèle perceptif avec un travail de représentation sur un continuum informe en donnant forme au perçu en même temps qu'il est transformé en expression. Cette transformation, qui s'apparente selon Eco à un travail sténographique, permet à l'émetteur de «fixer les résultats de son travail perceptif». (1992, p. 108) (Figure 50)

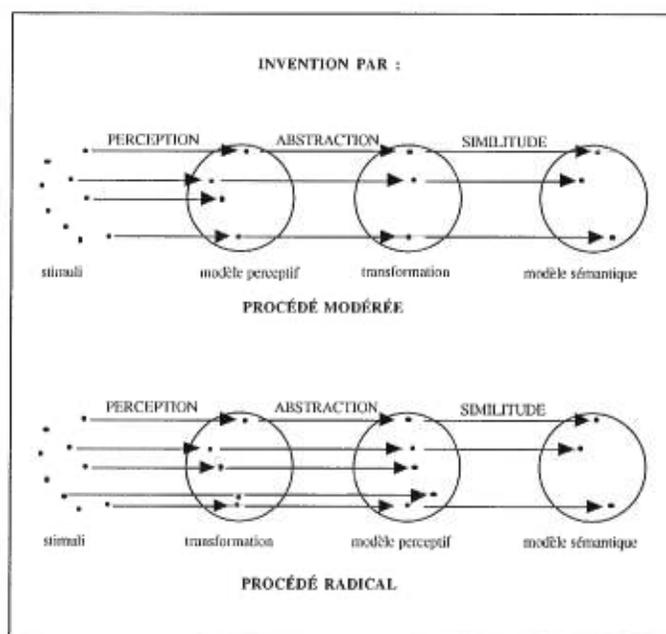


Figure 50. Procédé d'invention modéré ou radical (U. Eco, 1992)

Selon Eco, c'est sur ce principe qu'ont été effectuées toutes les grandes innovations de l'histoire de la peinture, et selon une approche de conception basée sur la polarité entre penser et voir plutôt que sur la dualité. Ce modèle dépasse le débat sur le «vu» et sur le «pensé» parce qu'il propose une *manière* de percevoir et non un *quoi*

percevoir. Il s'agit d'une proposition de convention nouvelle, «la fonction sémiotique n'existe pas encore et ne peut s'imposer», de la même façon que l'objet à concevoir n'existe pas et qu'il ne peut s'imposer. Contrairement à ce qui se passe dans la situation actuelle où l'informatique ayant des actions déterministes, finies et non ouvertes, a imposé une approche impérative qui impose une visualisation géométrique de l'objet, plutôt que d'agir par ses opérateurs sémantiques, en transformant le modèle en produit d'exécution et non en processus de conception.

Cette approche qui agit sur les codes actuels de représentation n'entre pas en contradiction avec les recherches en représentation géométrique. Elle n'est qu'une observation de l'acte de conception, qui nous est utile dans les études de cas où le sujet observé produit des objets «inventés». Il s'agit d'apprendre à lire les codes de comportement en sachant que l'homme réfléchit depuis toujours à l'organisation et à la réorganisation de ces codes. De la même façon, Eco nous dit qu'il n'y a pas de pure invention modérée ou radicale :

«Pour que naisse la convention il faut que l'invention de ce qui n'a pas encore été dit soit soutenue de ce qui a déjà été dit.... et que toute nouvelle proposition culturelle se profile toujours sur un fond de culture déjà organisée. Il n'y a jamais de signes en tant que tels, et beaucoup de soi-disant signes sont des textes ; et les signes et les textes sont le résultat de corrélations où entrent divers modes de production. Si l'invention était une catégorie de la typologie des signes, il serait alors possible de trouver des signes qui, en tant qu'inventions absolues et radicales, seraient la preuve tangible d'un état primordial du langage, conception qui est la grande découverte et la voie sans issue de la linguistique idéaliste». (1992, p. 111)

L'invention, et donc la conception, est observée comme un état de transformation continue, comme un produit sémiotique complexe et imprécis. L'organisation de la fabrication de l'artefact ne se présente pas d'une façon linéaire, mais par des liens dialectiques entre les codes de comportement. Ce qui signifie que la maquette, le modèle de figuration, possède des signes identifiables, un peu comme un texte informatique qui présente des fonctions et que nous allons observer pour voir comment l'on agit sur ces signes identifiables, pour comprendre les transformations sémiotiques ou physiques qui donnent forme à l'objet architectural.

6.5 La représentation graphique

La représentation du modèle qui permet la figuration de l'objet architectural est la représentation d'un modèle sémantique toposensitif, ce qui veut dire que les signes sont le résultat de divers modes de production. Par exemple, une carte géographique est une transformation projective stylisée et aussi une réplique. À propos des signes architecturaux, Eco (1992) nous rappelle que de nombreuses recherches on fait «apparaître une existence» d'unités sémiotiques en architecture. Par exemple, la représentation d'un escalier est un artifice sémiotique qui signifie un ensemble de fonctions données. Et il ajoute qu'il s'agit aussi d'un modèle toposensitif par une stimulation programmée et la stylisation, c'est-à-dire un ensemble d'expressions grammaticales d'un texte très complexe par la relation expression-contenu : les signes architecturaux sont des trompe-l'œil de fonctions non définies complètement.

Toujours à propos des signes et de leur représentation depuis la fin du XV^e, le *De Prospectiva pingendi* de Piero de la Francesca est considéré comme un rigoureux traité pour l'exécution et la construction des formes par la perception visuelle. Utilisé au départ, comme l'indique son titre, pour des fins d'analyse en peinture, ce texte a servi de point de départ pour plusieurs théories de la représentation qui, encore aujourd'hui, ne sont pas obsolètes. Au contraire, elles marquent une continuité de la pensée scientifique qui a été à la base de plusieurs inventions du XX^e siècle.

Le *De Prospectiva pingendi* se divise en trois livres. Le premier est consacré aux figures planes, le deuxième aux solides et le troisième, à la construction des corps en peinture. Dans un travail d'analyse de ces textes, M. Aprea montre que, nonobstant que le travail de Piero de la Francesca se base sur la géométrie euclidienne, ses effets se détachent de la géométrie classique et qu'il est important de souligner l'approche épistémologique qui anime Piero de la Francesca dans l'écriture de ses textes. En effet, dans son traité, il ne sépare pas l'expérience visuelle du contenu intellectuel de la dite expérience et il ne donne pas une description objective de cette expérience pour ensuite l'interpréter et la juger. Selon M. Aprea (1984), l'auteur définit dès le début les éléments constitutifs de la vision prospective et il souligne que ne doit être traité que ce qui est démontrable. Ce qui signifie que la démonstration, tout en n'ayant pas une valeur descriptive mais «théorématique», n'est pas dissociable de l'expérience.

Finalement, Piero de la Francesca présente un modèle qui permet la figuration de l'objet architectural par des méthodes de traitement de l'information et par une approche qui tient compte de l'expérience visuelle et du contenu intellectuel. Nous avons vu que depuis cinq cents ans, plusieurs théoriciens ont pris ces principes et les ont modifiés ou adaptés à la représentation architecturale pour aboutir au dessin d'architecture.

6.5.1 Le traitement de l'information par le dessin

Le traitement de l'information est la façon de codifier l'information pour la transmettre aux destinataires et en architecture, cette façon de codifier passe le plus souvent par le dessin. Les dessins d'architecture, précisons-le, étant des projections, c'est-à-dire un ensemble organisé de droites imaginaires qui permettent de définir l'objet à représenter en utilisant le plan comme moyen pour la représentation. Ces dessins, nous l'avons vu, peuvent être regroupés selon leur utilité ou les techniques de représentation. Nous pouvons, par exemple, avoir des dessins de présentation ou des dessins d'exécution. Ce qui ressort à la lecture de ces dessins c'est que leur caractéristique est de n'être pas un dessin final. Nous pourrions presque dire que le dessin est en réalité un dessein, parce que la personne qui le regarde effectue une projection ultérieure dans le temps qui est la réalisation du produit encore inexistant ; cette projection est sa faculté d'imaginer, de percevoir l'objet.

R. Evans nous dit que l'imagination de l'observateur, comparable à la projection, complique la circulation simple entre les objets et leur représentation en créant un facteur d'instabilité. Mais il ajoute que si nous enlevons l'imagination pour essayer d'atteindre un dessin techniquement parfait, le dessin «tombe très facilement dans la catégorie des simples agents techniques véhiculant par le fait même deux faussetés à savoir que le dessin ne modifie en rien ce qu'il représente (sauf s'il est mal fait), et qu'il peut propager des idées, mais jamais les faire naître. Ces illusions persisteront tant que l'on considérera un bon dessin comme le simple porteur de vérité. Il peut se passer autant de choses dans le dessin que dans ce qu'il représente». (1989, p. 20)

Evans nous rappelle, à ce propos, une citation de saint Thomas d'Aquin qui écrivait que l'architecte a d'abord une idée de maison, que par la suite il la construit, et que Dieu a fait l'univers de la même manière. Cette conception de l'architecte, nous dit

l'auteur, continue de nous hanter : penser avant de dessiner, comme si le concepteur tirait de son esprit des idées sans matière avant de les mettre sur papier. Ce qui montre que l'imagination ne peut fonctionner les yeux fermés. Elle se développe en transformant la réalité qui est transformée par l'imagination. Accepter cette idée signifie accepter aussi que la relation entre les idées et les choses est changeante, ce qui contribue à affecter notre compréhension du dessin d'architecture. Alors, nous essayons de traiter l'information avec les illustrations, la photographie. C'est de cette façon que la plupart des personnes connaissent l'architecture. Ou par des documents écrits qui se veulent être une analyse du processus de conception et de fabrication.

Nous avons plusieurs fois mis l'accent sur le fait que la méthode qui caractérise le mieux le dessin architectural est la projection orthographique qui est la projection d'une figure obtenue au moyen de perpendiculaires abaissées à différents points de cette figure sur une surface (Blau et al., 1989) et que l'avantage de ce type de projection sur la perspective, c'est l'exactitude des mesures qui donnent, par l'échelle, une copie presque conforme de l'objet architectural.

C'est depuis la Renaissance que cette méthode a été adoptée et puis améliorée par les théoriciens et praticiens de l'architecture. Déjà Raphaël en vantait les qualités en 1519 et exprimait le désir de l'utiliser. Peu après, A. Dürer faisait imprimer le premier livre qui montrait les projections orthogonales d'une figure réunies sur la même feuille pour mieux saisir ce type de représentation. Par la suite, A. Palladio, dans les *Quattro libri*, renforce cette façon de faire en recueillant sur la même feuille l'ensemble des projections pour essayer de donner une image la plus tridimensionnelle possible. Depuis deux siècles, les architectes ajoutent des perspectives à ces projections et dernièrement, ils ont ajouté des axonométries. Le but de ce système de représentation orthogonale permet d'établir les correspondances spatiales et de donner une image unifiée du bâtiment. Mais il ne réussit pas à créer une relation entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment si chère à B. Zevi. Pour cela, la technique du *spaccato*¹ a pris petit à petit son importance pour illustrer d'une façon picturale le rapport intérieur extérieur. (Figure 51)

¹ Le *spaccato* italien signifie littéralement cassé, écorché. Il s'agit d'une technique qui imagine de casser, éliminer une partie du bâtiment pour en voir l'intérieur.

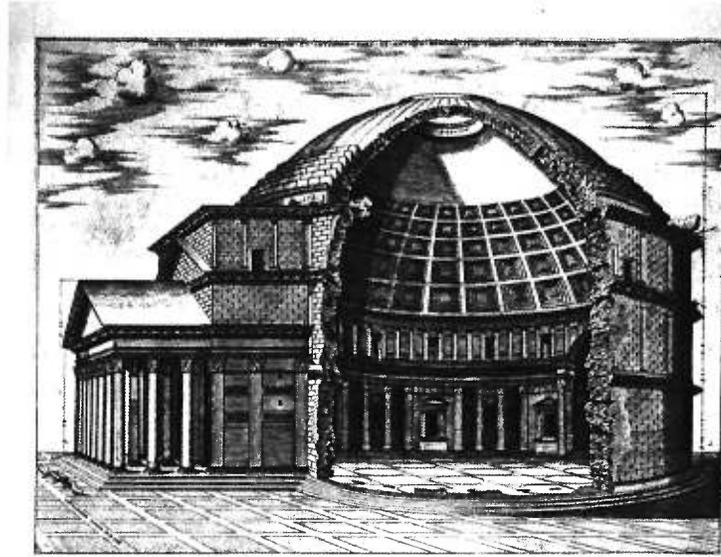


Figure 51. Le Panthéon, élévation et coupe en écorché, anonyme 1553 (E. Blau et al., 1989)

Cette technique de représentation atteint parfois des niveaux de quasi réalisme, mais elle pêche toujours par l'imprécision de l'image. Aussi bien les techniques du dessin isométrique que axonométrique, qui selon Blau et Kaufman (1989) étaient réservées traditionnellement aux projets militaires, s'étendent à l'architecture à partir du XIX^e. A. Choisy est un des pionniers de ces techniques. Il utilisait rarement les plans et les coupes pour représenter ses projets et il avait recours aux axonométries et parfois aux techniques du *spaccato* pour en montrer la structure.

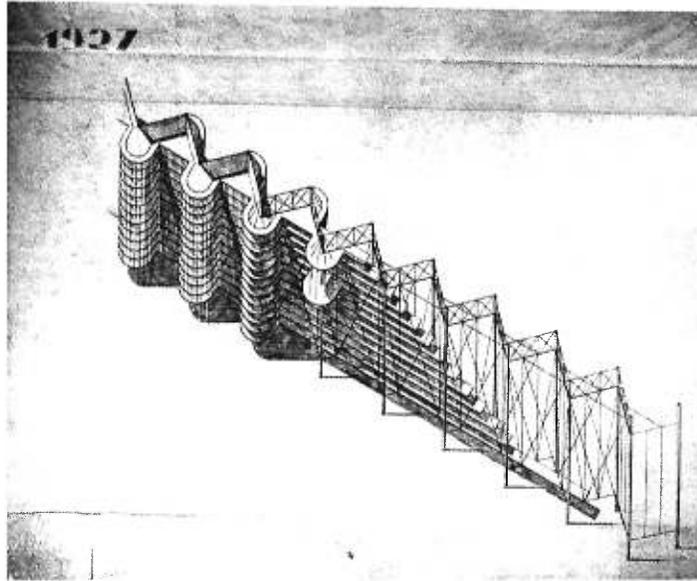


Figure 52. «Habitations suspendues» de Bodo Rasch (*L'architecture et son image*, CCA, 1989, p. 187)

Ces modèles axonométriques souvent épurés sont très présents pendant le constructivisme. En informatique, ils s'apparentent aux techniques du fil de fer. (Figure 52)

Enfin, au cours de ce dernier siècle, l'image photographique vient compléter le système de représentation orthogonal. Il s'agit aussi dans ce cas d'une construction perspective obtenue optiquement et circonscrite par la lentille de l'appareil photo.

Depuis, l'effort est mis sur une possibilité de capter la complexité spatiale et formelle des bâtiments pour chercher une correspondance dialectique avec les projections. Cette correspondance est difficile à créer et ce n'est que dernièrement que les relevés photographiques ont réussi à «matérialiser» cette image picturale à l'aide d'instruments électroniques et informatiques.

Selon les techniques utilisées, on peut maintenant identifier trois types de traitement qui, d'une certaine façon, renvoient aux phases de conception, exécution et réalisation : le traitement par simulation iconique, le traitement par simulation analogique et le traitement par simulation analytique. (Churchman, 1957 ; Van Norman, 1985)

6.5.1.1 *Le traitement par simulation iconique*

Le traitement par la simulation iconique a recours à des méthodes élaborées depuis la Renaissance. Les formes, les couleurs et les textures sont organisées selon des techniques de coloris et de projection qui relèvent de la peinture et du dessin. Le but est de saisir les masses et les volumes du bâtiment, ses rapports avec l'environnement, son aspect artistique ou utilitaire. Au cours de cette phase de conception, les esquisses décrivent les espaces et permettent une visualisation des volumes de la construction. (Figure 53)

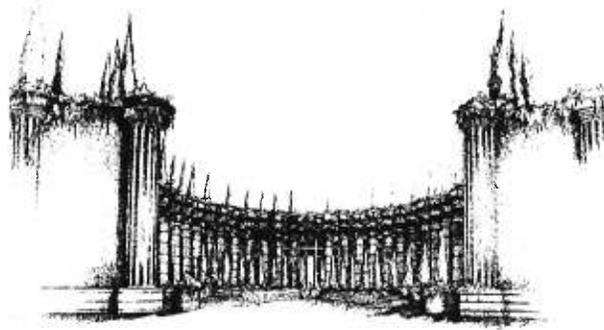


Figure 53. Exemple de simulation iconique, esquisse : les espaces d'Abraças.

(R. Bofill, *Taller de Arquitectura*, Espagne, dessin par P. Dillon)

6.5.1.2 *Le traitement par la simulation analogique*

Le traitement par simulation analogique traduit en un langage plus technique et plus précis que la représentation iconique, à l'aide des symboles conventionnels de l'architecture, les besoins spécifiques : mécanique, thermique, structure, pour n'en citer que quelques-uns.

L'assemblage de symboles et de signes traduit la fonction des espaces et les relations entre ces espaces, en indiquant les composantes architecturales. Ces dessins représentent l'œuvre architecturale sous la forme de projections graphiques à l'horizontale (coupes horizontales ou plans) et à la verticale (coupes verticales ou sections, élévations) ou encore par une élaboration graphique qui simule les trois dimensions (axonométries ou perspectives). Cette information est transmise sous forme de dessins organisés selon des codes qui permettent au *team building* de «lire» ce qui est nécessaire à la compréhension et à l'exécution de sa tâche. (Figure 54)

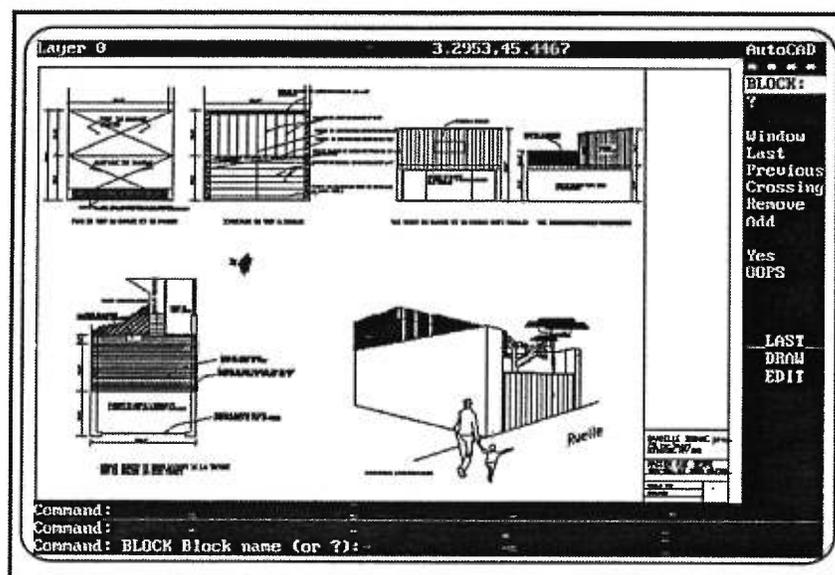


Figure 54. La maison Dionne sur la rue Berri, exemple de dessin d'exécution

(Traitement avec Autocad V.13, G. De Paoli, architecte 1989)

On regroupe les dessins d'exécution en fonction des disciplines auxquelles on les destine. Les informations transmises au moyen de codes propres à chaque spécialité instruisent les corps de métiers de la façon de produire et d'agencer les matériaux pour obtenir l'effet souhaité par l'architecte.

Les modifications apportées en cours de route sont parfois si importantes qu'elles peuvent transformer l'aspect de l'œuvre telle que conçue initialement. Nombre d'impondérables font que l'architecte doit être en mesure d'apporter des modifications au projet dans des délais brefs, et de transmettre rapidement l'information aux divers

intéressés, car une seule modification peut faire boule de neige et exiger un remaniement de tous les plans et documents du projet. (De Paoli et Pellissier, 1992)

La forme initiale est repensée, déformée, adaptée et réalisée. Selon cette démarche, la forme n'est pas la résultante d'une analyse-solution, ni d'une simple liste de fonctions, mais résulte plutôt d'une activité cybernétique. Les fonctions (activités) sont considérées comme un procédé de vérification de l'idée architecturale, «un procédé spécifique à la pensée architecturale : la préfiguration mentale d'un problème à travers la représentation évolutive de la forme». (Portoghesi, 1981)

Dans une recherche de normalisation à cette étape du travail d'exécution où la redondance, l'ambiguïté, la cohérence, l'intégrité sont les principaux critères d'évaluation d'une stratégie de codification, il m'apparaît évident que la compréhension passe par une réécriture du symbole graphique, symbole qui a été transposé de la table à dessin à l'écran, sans plus de réflexion sur les liens entre les objets.

Le modèle de simulation graphique que nous pouvons construire aujourd'hui avec les ordinateurs nous affranchit d'une géométrie descriptive en nous permettant de construire des symboles tridimensionnels d'un objet. Ces symboles pourront être le déclencheur pour remplacer ceux utilisés pour les projections bidimensionnelles qui sont encore le véhicule officiellement reconnu par les ordres professionnels.

Le bâtiment est un ensemble d'objets entre lesquels nous pouvons créer des liens. Ces liens doivent permettre une interaction entre les objets ; ils se traduisent par la description hiérarchique des primitives qui constituent l'objet. La classification devra se faire en fonction d'une hiérarchie des connaissances: il faut considérer une hiérarchie bipolaire et l'information doit circuler dans les deux sens. Les nouveaux outils de modélisation en programmation orientée objet intègrent cette notion d'«héritage»¹.

¹ «Il s'agit de proposer un environnement de programmation qui offre des primitives qui tiennent compte de toutes les observations effectuées sur le caractère spécifique du processus de conception. Cet environnement reprend les idées essentielles des trois courants en intelligence artificielle :

- la programmation orientée objet ;
- la programmation par contraintes ;
- la programmation par logique» (Lassoed, 1991)

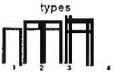
«Actuellement la programmation orientée objet implique un découpage sémantique de la réalité, lequel est arbitraire ou du moins relié à une compréhension spécifique selon les gens et l'époque. Une description

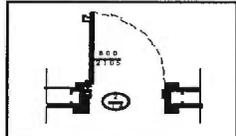
Créer un modèle tridimensionnel d'un objet sur un support électronique dans une banque de données totalement indépendante des projections bidimensionnelles, assure aussi qu'il n'y ait pas d'ambiguïté géométrique ; les informations sont complètes et les projections de l'objet ne sont que des résultats de sortie. (Parisel, 1990)

6.5.1.3 Le traitement par simulation analytique

Actuellement, l'information contenue dans les dessins graphiques est complétée par des rapports qualitatifs et estimatifs précisant les caractéristiques des choix exprimés par les symboles graphiques. L'architecte rédige aussi le cahier des charges qui a pour but de décrire ce qui n'est pas rendu graphiquement dans les dessins.

Les dessins produits lors de la simulation technique sont complétés par l'apport d'information qui est traitée analytiquement, soit sous la forme de dessins schématiques, comme les bordereaux ou tableaux des portes et des finis, soit sous la forme de documents écrits : le calcul des quantités et le devis descriptif. (Figure 55)

TABLEAU DES PORTES																																
etage	no. de la porte	communication	porte				cadre		accessoires			quincailerie					autres															
			type	matériau	épaisseur	hauteur	no. de vantaux	diagramme d'ouverture	désignation d'ouverture	type	matériau	seuil: matériau	type	seuil	type	grilles		dimension	type	chemise	verrou	poignée	plaque	poignée	type	à l'air	verrou	base				
1	14	2	3	4	5	10	100	1	MO	1	A	B	C	A	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
			Portes				Cadres		Seuils			Grilles			Vitrages																	
			types				types		Matériaux			Types			Types																	
									A B C			A B C			A B C D E F G H I J K L M N O P Q R																	
			Matériaux A Bois - sans plaque B Bois - avec plaque C Acier				Matériaux A Acier B Bois C								Types A Trempe B Sécurité C																	



factuelle de la forme et de la matière pourra exister sans être nommée et avoir plusieurs appellations , par exemple : colonne, rampe, etc.» (Parisel, 1999)

Montreal Projet: CRCAO devis	PORTES INTERIEURES	Section 08 961 Page 1 Janvier 1997
2.2 Portes intérieures	<p>.1 Portes en bois à âme pleine: âme en bois massif de 35 mm. d'épaisseur, recouvertes des deux côtés d'un placage de bois franc de 5 mm., fixé à l'aide d'une colle à preuve de l'eau, fini chêne blanc. Cants latéraux en érable d'un minimum de 16 mm., collés à l'âme.</p> <p>.2 Traverses supérieure et inférieure de 35 mm. d'épaisseur en érable.</p> <p>Âme en blocs de bois de faible densité de longueur variée ne dépassant pas les 45 mm. de large, à joints décalés.</p> <p>Colle: Urée type 1 - résistante à l'eau.</p> <p>.3 Omologation ACNOR D132.EM</p> <p>.4 Poncer les surfaces apparentes et les préparer pour la peinture.</p> <p>Avant de les expédier au chantier, imbibber tous les éléments en bois d'un préservatif incolore, conformément aux exigences de la norme ACNOR D132-1978, section 5</p>	
2.3 Pièces de quincaillerie	.1 Munir les portes d'un mécanisme de manœuvre	

Figure 55. Exemple de tableau des portes et devis descriptif (De Paoli et Pellissier, 1992)

Cette partie de l'information a été la première à être informatisée. Une étude menée par l'IRAC (Institut Royal d'Architecture du Canada) en 1983 indiquait que déjà 26% des firmes en architecture utilisaient l'informatique pour les tâches de traitement de texte et de travail analytique. Cette même recherche orientée sur l'impact économique et organisationnel de l'utilisation de l'ordinateur proposait, déjà dans les années quatre-vingts, la mise en place d'une banque virtuelle de bases de données et l'uniformisation des symboles et des couches de travail.

Chapitre 7 La programmation des logiciels en CAO

Étudier les logiciels de CAO pour les analyser et extraire les opérations possibles pour chaque logiciel est une tâche extrêmement ardue. Nous assistons à une croissance continue de logiciels de dessin assisté par ordinateur en même temps qu'à la disparition d'autant de programmes. Plusieurs s'appuient sur la géométrie euclidienne, d'autres surpassent ces concepts, d'autres, encore plus ou moins complets, exploitent le réseau internet et le concept de partage de noyaux ou «moteurs» logiciels.

Cette continue transformation m'a fait réfléchir à des questions plus fondamentales, comme la géométrie et les algorithmes¹ qui gèrent le monde de l'infographie.

L'étude des logiciels et en particulier de certains programmes définis comme «minimalistes», (Marty, 1994) m'a permis de comprendre les bases de la création des programmes infographiques et de poursuivre le travail entamé avec A. Marty à la suite d'un projet de recherche réalisé entre 1992 et 1996 dont les objectifs étaient :

- étudier des dispositifs matériels et logiciels qui permettent le dialogue entre un utilisateur et un système informatique ;
- évaluer les techniques de conception et de spécification des applications informatiques ;
- préciser la fonction de l'ergonomie et trouver les moyens visuels qui permettent une meilleure exploitation des applications logicielles ;
- réaliser des maquettes virtuelles de bâtiments associant si possible les cinq sens.

¹ «Le terme algorithme tire son origine du nom du mathématicien persan *Al Khwarizmi* qui vécut vers l'an 820. La paternité de la notion d'algorithme ne peut cependant lui être attribuée, puisque cette notion est connue depuis l'Antiquité, comme en témoignent les écrits de Diophante d'Alexandrie et d'Euclide datant du IV^e siècle av. J.-C.

Un algorithme consiste en la description d'une suite d'opérations élémentaires non ambiguës. Il s'achève après un nombre fini d'étapes et produit un résultat. Dans la plupart des cas, un algorithme requiert des données, dont la taille est nécessairement finie. La notion d'algorithme a été formellement étudiée à partir du début du xxe siècle, bien avant l'apparition des premiers ordinateurs. Pour simuler le fonctionnement des algorithmes, les mathématiciens de cette époque ont imaginé des machines abstraites, et sont parvenus à cerner la classe des problèmes qui peuvent être résolus par ces machines. La branche des mathématiques traitant de ces questions est la *théorie de la calculabilité*. (P. Hernert, 1995, p. 3)

Ce travail de recherche sur les programmes informatiques m'a permis de constater que le dessin par ordinateur est un modèle de simulation graphique qui nous permet de réaliser un modèle d'objet, donc l'objet, et que cette simulation produit des connaissances. C'est pour cela que le dessin tout seul ne peut pas être la simple image de l'objet. Aujourd'hui, nous assistons souvent au débat entre les tenants de la représentation virtuelle *mapping* et ceux de la représentation par modélisation, mais si nous voulons transmettre grâce à l'ordinateur des connaissances qui sont à la fois logiques et à la fois analogiques, nous nous apercevons que nous devons opter pour une modélisation qui nous permette en tout temps d'avoir une image que je qualifie de vive et active de l'objet à construire, tout en tenant compte, comme le souligne A. Watt que «*Computer graphic is an inexact science*» (1989, p. 399). En effet, pour reproduire des images en trois dimensions, nous utilisons des formules mathématiques rigoureuses et exactes alors que les aspects du *shading* (ombrage et maquillage) sont grossièrement simplifiés. A. Marty souligne à propos des outils de CAO :

«Et pendant que nous nous posons ces graves questions, la jeune génération s'entraîne sans complexes sur des superbes jeux vidéo qui préfigurent les outils de CAO de demain (interaction avec des espaces complexes et mouvants, déplacements en temps réel, contacts, textures riches, multimédia, ... Et pour construire ce modèle 3D, comme dans un jeu, on imagine l'architecte entrer dans un magasin virtuel, on l'imagine choisir des briques virtuelles sur des étagères virtuelles, les placer soigneusement sur les murs en construction d'un bâtiment virtuel... On l'imagine recommencer ces gestes autant de fois que nécessaire pour peaufiner son œuvre, et on le devine un peu fatigué par toutes ces allées et venues chaotiques... Au point qu'on en vient à lui souhaiter de penser à mettre un peu d'ordre dans tout cela en prenant par exemple un crayon et un petit carnet quadrillé bien réels pour dessiner à la main -oui à la main!- quelques schémas abstraits, puis des plans, des coupes, des élévations, des axonometries, et des croquis perspectifs... en bonne application de quelques règles de la géométrie vieille de vingt siècles.» (1995)

7.1 Les outils de dessin et de conception assistés par ordinateur

L'émergence de l'informatique comme outil potentiel d'aide à la conception a suscité un renouvellement profond dans l'exploration des processus de conception, le *design method*, et pendant plusieurs années, on a tenté d'assimiler le processus de conception à un processus scientifique ou technologique. (Ph. Boudon, 1994)

On avait appelé le processus de conception programme et on était convaincu qu'une bonne programmation devait permettre de définir les problèmes et que l'ordinateur pouvait être l'outil adéquat pour manipuler la complexité de l'information traitée lors de la conception du bâtiment. Les affirmations de C. Alexander orientent la recherche dans cette direction et établissent les premières bases épistémologiques et méthodologiques de l'utilisation de l'ordinateur en architecture :

«Le travail principal de l'architecte va donc résider dans l'énoncé des problèmes. C. Alexander propose d'analyser le problème architectural en termes d'exigences, de besoins élémentaires, qui doivent être structurés par l'analyse des relations qu'ils entretiennent entre eux. Mais le concepteur se heurte à une difficulté majeure qui est le nombre important de relations entre les éléments du problème et l'impossibilité qu'il a de les prendre en compte de façon exhaustive dans les opérations de synthèse qui doivent le conduire vers une solution. Considérant l'ensemble de ces relations comme une représentation du problème global en sous problèmes. Le problème général étant représenté par un arbre, chaque sous problème pouvant être assimilé à des sous ensembles fortement liés. L'outil mathématique et l'ordinateur apparaissent alors comme le moyen efficace pour explorer les «dix milliards de jonctions» que l'on peut trouver dans un projet d'architecture.» (Quintrand, 1985, p. 34)

Pourtant, déjà au début des années 70, certains chercheurs, dont M. Tribus, proposaient une réadaptation du langage ordinateur en le détachant de la démarche du *problem solving*. Tribus, en développant sa théorie du projet, proposait un plan systématique sur l'art de la décision dans un projet. Il nous rappelle que, à chaque étape du projet, on est obligé de prendre des décisions, dont certaines sont irrévocables, et ceci sur la base d'une information partielle. Il présente une démarche pour un ordinateur à logique inductive :

«Les problèmes de logique inductive laissent toujours un résidu de doute dans l'esprit. La plupart des gens préfèrent trouver une solution en utilisant une logique déductive parce qu'alors ils peuvent être sûrs d'avoir raison. Souvent des ingénieurs prétendent qu'un problème peut être résolu par déduction, simplement parce qu'ils ont plus de facilité pour ce genre de raisonnement et qu'une réponse déterministe leur apporte une plus grande satisfaction personnelle.» (1972, p. 4)

En proposant un ordinateur qui puisse fonctionner à partir d'une information partielle, on crée un lien entre l'objet tridimensionnel et ses projections : nous pouvons observer sur les plans les résultats et si nous ne sommes pas satisfaits nous pouvons

revenir à l'origine ; l'ordinateur ne donne qu'un *output* modifiable qui élimine une redondance de l'information.

Les outils de travail de l'architecte sont des outils de communication et de simulation du projet avec les spécialistes et les non spécialistes ; ces outils doivent permettre une expérimentation, une observation, une «mesurabilité» du modèle et offrir la possibilité d'en modifier le résultat avant sa réalisation. Selon McKechnie (1977), qui a essayé de classer les simulations architecturales, nous pouvons diviser ces simulations en simulations de type concret (*perceptual*) et statique ou abstrait (*conceptual*) et dynamique. (Figure 56)

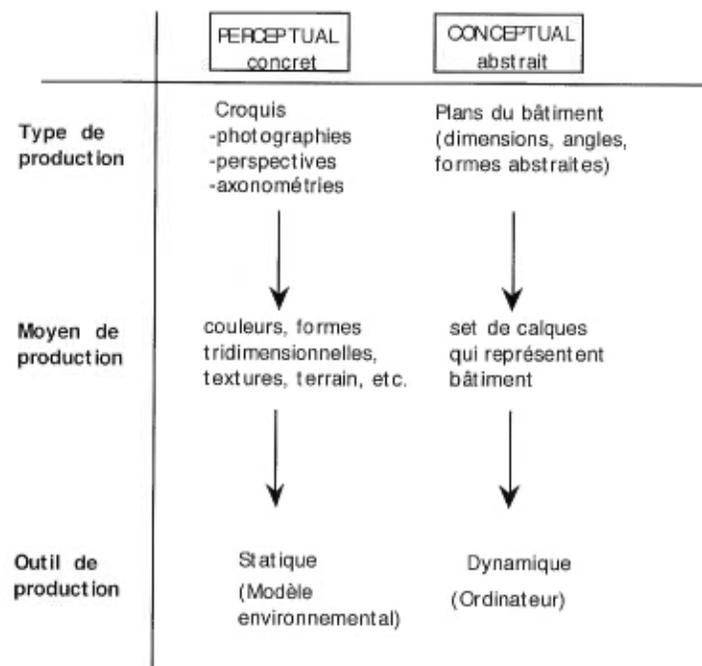


Figure 56. Interprétation de la typologie proposée par McKechnie (1977)

L'«outil» dessin a été utilisé traditionnellement pour reproduire l'achèvement d'un processus de conception, plutôt que pour servir d'outil de prise de décision pendant tout le processus.

Avec les non spécialistes, l'architecte utilise des moyens visuels qui essaient le plus possible de créer l'illusion de la troisième et, parfois, de la quatrième dimension. Cette simulation visuelle a été représentée depuis toujours par la maquette,

accompagnée selon l'évolution de la géométrie projective, par des représentations bidimensionnelles qui tentent de créer l'illusion de la troisième dimension.

Avec les spécialistes, l'architecte utilise des moyens graphiques en essayant le plus possible de représenter la réalité de la construction jusqu'au moindre détail. Cette simulation est représentée par les dessins techniques (d'exécution) reproduits sur papier et reconnus comme unique document légal de l'architecte.

Pour optimiser le travail de l'architecte avec un écran-et-souris plutôt qu'avec le papier-et-crayon, on doit donc comprendre un certain nombre de problèmes tant du côté des techniques informatiques que du côté des méthodes de pratique de l'architecte.

7.2 La modélisation

Une maquette en architecture est un objet qui peut être vu sous tous ses angles et qui représente les vues de l'objet que l'architecte a conçu. Transformer ce modèle pour qu'il soit «vu» à l'écran d'un ordinateur, signifie créer une maquette numérique, ou si l'on veut, une description géométrique de l'objet architectural pour qu'il soit «lu» du point de vue informatique et où le point de départ repose sur une analyse systémique de l'objet architectural. Pourtant, nous l'avons vu dans les investigations faites jusqu'à présent, la maquette en architecture et sa représentation «sensible» a une autre valeur que j'ai qualifié de sémantique et d'autres opérateurs que ceux qui définissent sa description géométrique et ce sont ces opérateurs que l'architecte ne peut pas contrôler et «matérialiser virtuellement» qui peuvent être la cause d'un blocage dans l'adoption de l'informatique en conception.

Ce passage de l'objet externe à l'objet interne s'appelle modélisation et est fait en suivant un schéma que C. Pair et M.C. Gaudel proposaient déjà en 1985 (Quintrand, 1985) :

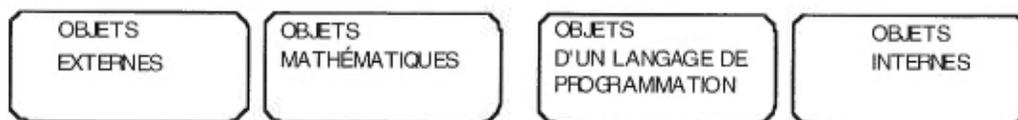


Figure 57. Schéma de modélisation selon C. Pair et M.C. Gaudel (Quintrand, 1985)

Ce passage est celui où le concepteur doit décrire la nature géométrique des objets à manipuler. Cette description doit nécessairement passer par la saisie de l'objet, c'est-à-dire par la définition non ambiguë des coordonnées x,y,z de chaque point. (Quintrand, 1985)

Selon Quintrand, là réside la première difficulté rencontrée à l'époque par l'architecte : mesurer avant de représenter. Et au-delà de cette problématique, l'architecte sera confronté à un objet de plus en plus complexe et à une logique qui permet à l'ordinateur de traiter l'information d'une façon adéquate pour les opérations souhaitées (univers géométrique) et de rendre transparentes les opérations de décomposition/recomposition des objets (univers instrumental). Le travail du concepteur consistait donc à manipuler les primitives mises à sa disposition par le logiciel, de la même façon que sur sa table à dessin il devait composer avec des lignes et des points.

Encore aujourd'hui, les applications informatiques destinées à la représentation d'un objet peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les applications 2D, dans lesquelles la représentation du bâtiment se rapproche de la méthode traditionnelle, c'est-à-dire des vues planes qui n'ont pas de relations associatives entre elles. Dans ce cas, chaque modification apportée à une vue exige qu'on modifie, l'une après l'autre, les autres vues ; ces applications permettent, depuis quelques années, l'extrusion des vues en plan généralement par l'étirement de l'objet de base. Dans ce cas, les modifications de dimension apportées aux vues en plan s'appliquent partiellement aux vues en 3D (selon le type de traitement, elles seront appelées 2D et demie et faux 3D).
- Les applications 3D, qui permettent de représenter exactement les formes dans l'espace tridimensionnel. La saisie des données géométriques de l'objet virtuel est faite dans les trois dimensions, ce qui signifie que toute modification aux dimensions de l'objet entraîne la modification instantanée des vues en plan, des coupes et des élévations tirées de l'objet en trois dimensions.

7.2.1 Les applications 2D : le modèle bidimensionnel

Les grands changements que les méthodes de production en architecture ont subis sont indissociables de l'évolution du rôle de l'architecte et de la dynamique entourant la réalisation du projet architectural. Ces changements, nous l'avons vu, ont été assimilés à l'évolution de la géométrie descriptive depuis la Renaissance jusqu'à nos jours. En effet, le dessin d'architecture est passé progressivement au dessin d'ingénierie ou scientifique pour en arriver à une normalisation des plans d'architecture.

Il paraît évident que les premiers concepteurs des applications pour l'architecture se sont adaptés à ce type de représentation et ont développé leur structure de représentation de l'image en se basant sur la géométrie euclidienne et sur la représentation par des coordonnées. (Figure 58)

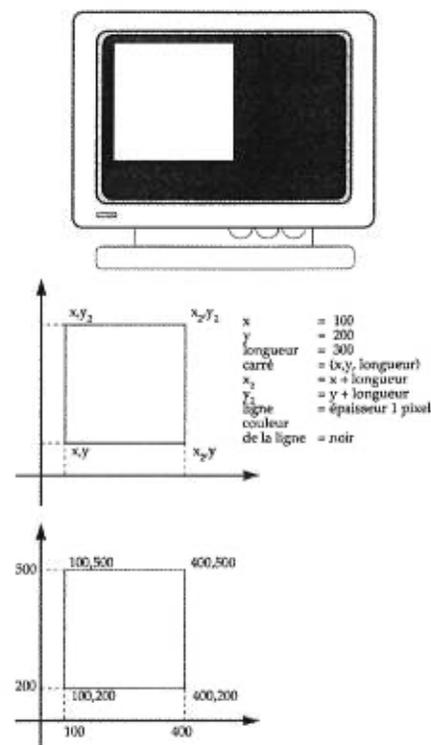


Figure 58. La représentation par coordonnées (De Paoli et Pellissier, 1992)

Le dessin par ordinateur est la description mathématique d'une image formée d'un ensemble d'éléments comme la ligne ou le point. Chaque élément graphique qui apparaît à l'écran devient la composante d'un ensemble et son existence est liée au sort de cet

ensemble. La base de données graphiques dans laquelle s'inscrivent les données mathématiques qui décrivent les éléments constitue le noyau de ces logiciels. La facilité de traitement des données mathématiques dépend de la structure de la base de données graphiques. En effet, chaque changement qu'on apporte aux données mathématiques entraîne des modifications de l'image ou de son emplacement. Ces modifications nous permettent de manipuler, notamment d'agrandir, de rétrécir, de déplacer, de copier ou de multiplier l'image représentée à l'écran. (Figure 59)

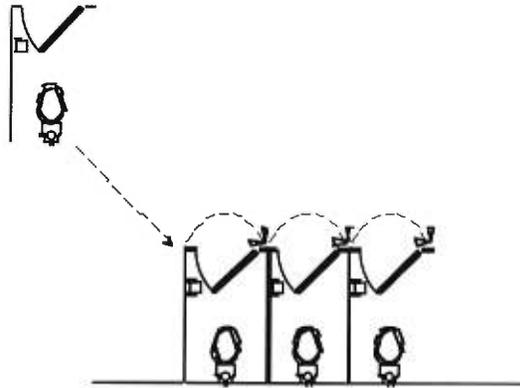


Figure 59. Copie d'un objet (De Paoli et Pellissier, 1992)

Les images sont des objets virtuels définis par des paramètres et regroupés de façon logique. Les applications définissent l'objet non seulement par des coordonnées mais aussi par des attributs qui tentent de donner la description réelle de l'objet.

Les objets qui contiennent des informations communes sont regroupés sur des couches ou niveaux virtuels qui sont l'équivalent électronique des feuilles de papier calque, chacune portant une partie de l'information pour la classification, le contrôle et la manipulation des objets. Ces applications sont bâties autour :

- des éléments qui servent à produire les images, ou primitives ;
- des outils qui regroupent et manipulent les primitives (commandes d'édition) ;
- des informations de nature graphique assignées aux primitives, ou propriétés ;
- des informations de nature alphanumérique assignées aux objets virtuels, ou attributs. (Figures 60 et 61)

Objet virtuel = Symbole graphique + Attributs graphiques + Attributs alphanumériques de l'objet

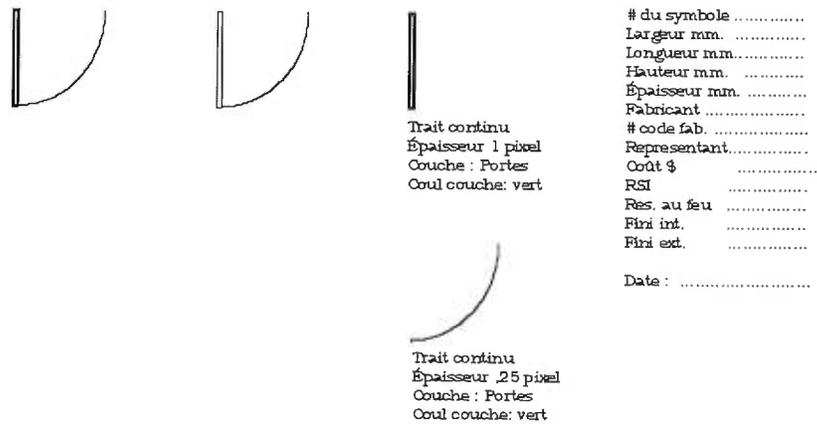


Figure 60. L'objet virtuel (De Paoli et Pellissier, 1992)

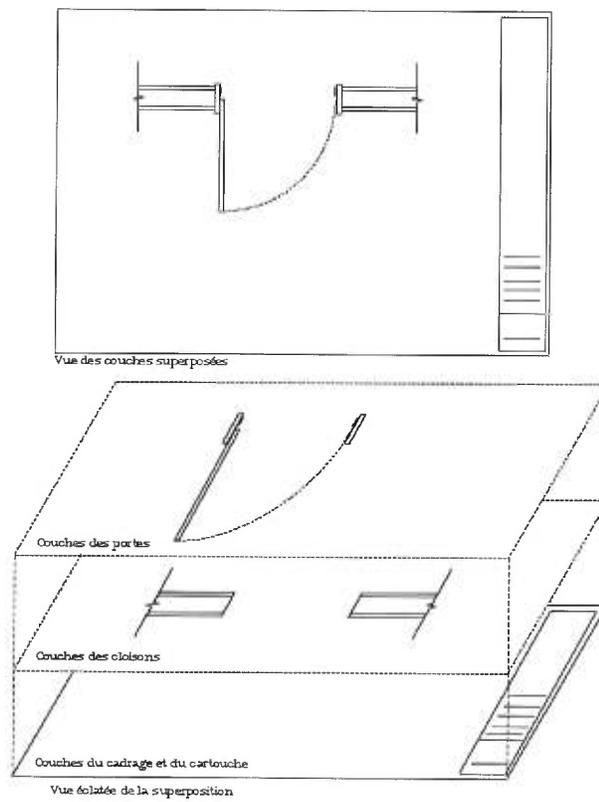


Figure 61. L'objet et son classement par couches (De Paoli et Pellissier, 1992)

7.2.2 Les applications 3D : le modèle tridimensionnel

L'architecte, lors du traitement de l'information, va et vient continuellement d'une représentation bidimensionnelle (les plans et coupes) à une tridimensionnelle (l'idée du parti architectural). C'est ainsi qu'il valide la conception de l'espace.

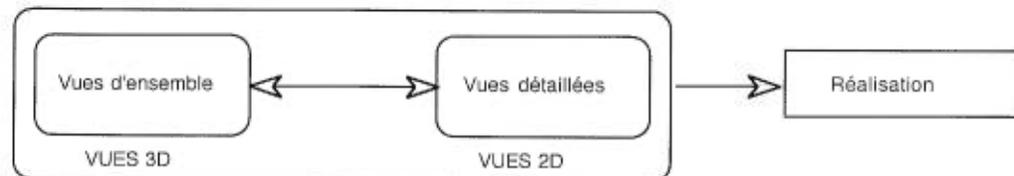


Figure 62. Validation du processus de conception

Les modèles créés doivent donc permettre cet aller-retour continu entre les représentations bidimensionnelles et tridimensionnelles. (Figure 62)

Les applications ont permis de développer de nouvelles formules mathématiques (algorithmes) adaptées à la représentation et à la modification des objets créés. Les applications 3D ont, pendant longtemps, représenté les objets seulement par des modèles en fil de fer où seuls les arêtes et les sommets de l'objet étaient définis de sorte que les objets étaient transparents et ne permettaient pas l'effacement des arêtes cachées. Même si l'avènement continu de nouveaux modèles et de modèles hybrides peut compliquer le classement, nous pouvons aujourd'hui distinguer :

- Les modèles surfaciques qui ajoutent au modèle en fil de fer des surfaces délimitées par des arêtes et des sommets, ce qui permet d'éliminer des lignes et des surfaces cachées. Le modèle surfacique est une représentation par les frontières (le B-Rep Boundary Representation étant le principal représentant de cette catégorie), c'est-à-dire un modèle filaire qui introduit une information topologique permettant de pallier aux inconvénients des systèmes filaires. Nous pouvons dire que les primitives de ce modèle sont les faces, les côtés et les sommets. Les objets sont représentés par un arbre qui aura une profondeur constante, indépendamment de la complexité de l'objet. (Figure 63)

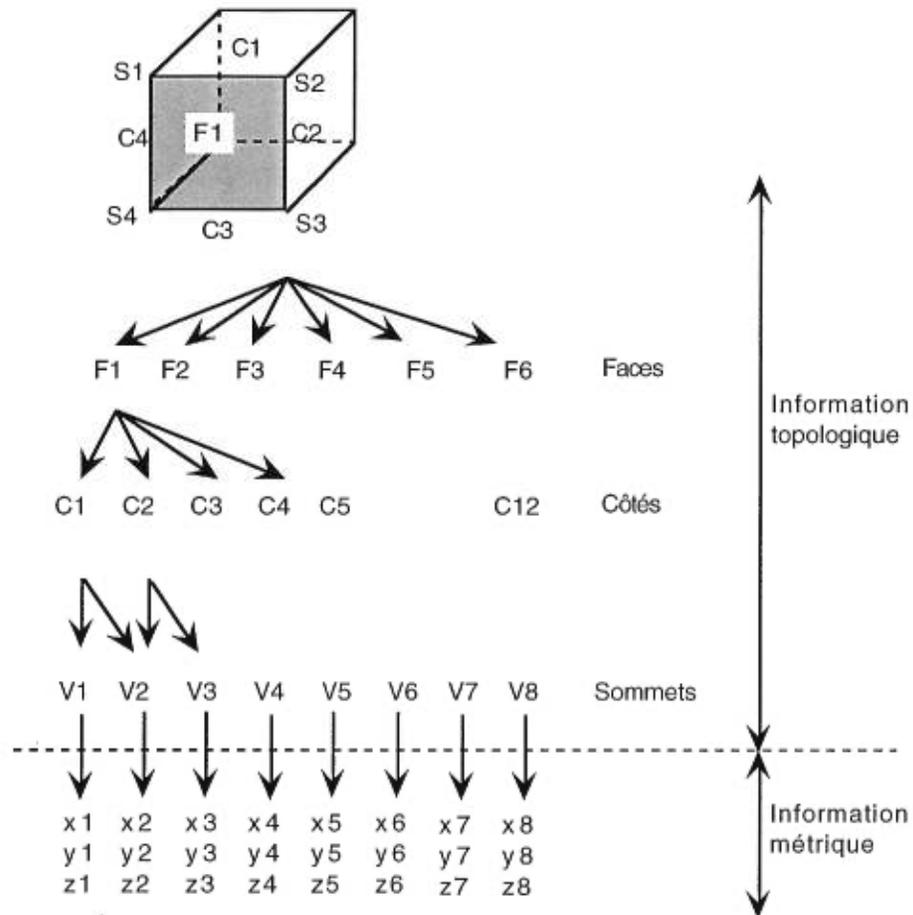


Figure 63. Représentation par les frontières d'un cube (M. Dürr, 1989)

- Les modèles volumiques, les plus proches de la réalité parce qu'ils permettent non seulement une définition des arêtes et des faces, mais aussi de la matière composant l'objet représenté qui sera ainsi constitué de matériaux ayant des caractéristiques physiques. Les modèles volumiques construisent l'objet par assemblage, union, intersection ou différence des formes élémentaires telles que les cylindres ou les sphères, d'où le nom de modèles CSG (*Constructive Solid Geometry*) qui sont les principaux représentants de cette catégorie. Ces formes peuvent être modifiées par des transformations géométriques telles que la translation ou l'homothétie. Nonobstant certains efforts de décomposition architecturale, le plus gros obstacle pour l'architecture reste encore la décomposition des objets en forme élémentaire. De plus, considérant que le nombre de primitives est limité, l'arborescence CGS peut être très profonde. (Figure 64)

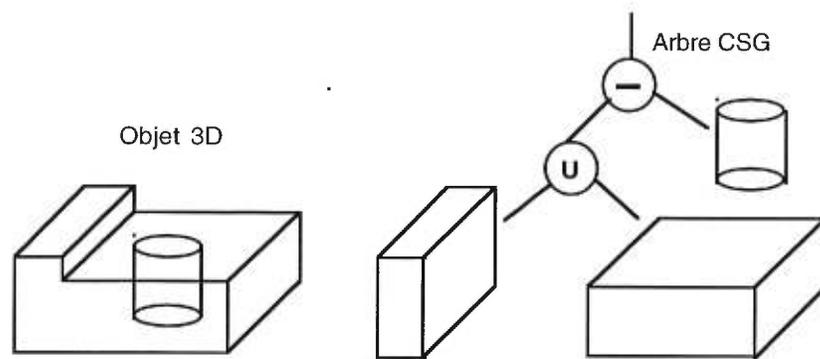


Figure 64. Exemple d'objet 3D et de sa représentation CSG (Cambray, 1992)

Ces deux types de modèles B-rep et CSG sont les plus répandus : le système CGS permet de représenter un grand nombre d'objets classiques en architecture, mais il ne peut pas représenter des formes «libres» ; le système B-Rep peut représenter n'importe quel objet polyédrique, mais la difficulté réside dans la définition des faces d'un objet. Les opérations booléennes (union, soustraction, etc.) sont beaucoup plus faciles avec une représentation CSG qu'avec le B-Rep. Nous pouvons souligner que dans les deux cas il est possible d'utiliser une base de données pour stocker les informations. (B. Cambray, 1992)

Une évolution de ces modèles a été la création de modèles topologiques qui permettent d'intégrer la topologie, c'est-à-dire la description des connexions entre les composantes d'un objet (volumes, faces, arêtes, sommets). Ces modèles sont utilisés pour intégrer des propriétés comme l'adjacence ou la proximité entre les objets.

On s'est souvent interrogé, en architecture, sur le choix du modèle (volumique ou surfacique) à utiliser, pour en venir à la conclusion que le concepteur utilise un mélange des deux modèles : le surfacique pour la conception des formes-espaces et le volumique pour l'étude des éléments constructifs du bâtiment. Les logiciels de CDAO en architecture permettent cette double approche, mais en même temps, ils posent des problèmes de cohérence géométrique entre les composants. Dans une étude sur l'état de l'art de la modélisation, B. de Cambray dit :

«Aucun modèle de CAO existant n'est parfait ou universel. Aussi le besoin est-il apparu de combiner les avantages de plusieurs modèles en construisant des modèles hybrides.

Les modèles qui peuvent être qualifiés de “mathématiques” regroupent des modèles dont le support mathématique est prépondérant comme les modèles fractals ou les modèles CAO de courbes et surfaces mathématiques que sont les courbes et surfaces de Bézier, Coons, B-spline, b-spline, NURBS... Ces modèles ne modélisent pas forcément des solides, c’est-à-dire des objets 3D possédant un volume intérieur et un volume extérieur. Ces modèles de courbes et surfaces permettent de définir des formes 3D fabriquées industriellement (ou artisanalement) comme des pièces d’avion ou de voiture, des meubles... Elles modélisent des courbes et des surfaces 2D ou 3D mais pas forcément des volumes clos.» (1992, p. 69)

Au départ, les systèmes de modélisation ont appuyé leurs stratégies algorithmiques sur la géométrie euclidienne et la topologie ou sur la théorie des ensembles. Mais un certain constat d’échec dans l’utilisation de la CAO par les architectes a amené les chercheurs à explorer d’autres approches que celle de la géométrie descriptive et à vérifier si d’autres stratégies de modélisation pouvaient être mieux adaptées à l’«action» de l’architecte pendant les phases de conception et de réalisation du projet. Finalement, il s’agit de mettre à l’épreuve non seulement l’approche méthodologique, mais aussi la stratégie algorithmique pour explorer de nouvelles pistes de représentation visuelle.

B-rep (*Bondary representation*) ou CSG (*Constructive Solid Geometry*) sont les deux principales approches dans la modélisation des solides, mais la diversité des méthodes proposées jusqu’à maintenant ne permet pas une étude exhaustive et comparative. De plus, selon la discipline architecture ou informatique, plusieurs types de classement se présentent. Par exemple en informatique, plusieurs études ontologiques sur la terminologie à utiliser dans le domaine de la conception des artefacts se basent sur les méthodologies créées à la base du concept de conception de systèmes de CAO. Par exemple S. Donikian (1992), dans sa thèse sur *Une approche déclarative pour la création de scènes tridimensionnelles*, souligne la différence entre :

- les systèmes qui sont une extension des systèmes classiques et qui utilisent des objets paramétriques ; ces systèmes sont très proches des modèles géométriques traditionnels et ils ne conviennent pas à la réalisation d’artefacts complexes ;
- les systèmes liés à la construction de systèmes experts, qui visent un domaine particulier et qui ne conviennent pas à une conception dans un domaine représenté par des règles et des contraintes.

Il souligne aussi la présence de l'approche déclarative et de l'intérêt croissant de cette «méthodologie». Selon V. Popov, dans son travail de thèse qui propose le formalisme d'un système de conception déclarative de scènes 3D synthétiques, appelé *Decodes (Declarative Cognitive Design of Scenes)*, la conception de scènes par l'approche déclarative consiste à offrir des moyens pour exprimer en termes de langage les besoins de chaque étape du cycle de l'évolution du processus de conception. (1998)

V. Popov souligne aussi que selon le point de vue «informationnel» le modèle peut être utilisé différemment pour des fins de documentation ou pour la mise en œuvre de calculs, selon les applications et le processus dans lequel il prend place et que ces modèles que l'auteur appelle descriptifs, d'exploitation et de communication, s'adaptent aux domaines particuliers, pour définir les caractéristiques d'une scène (modèle principal) ou pour représenter la scène au niveau des liens entre les différentes applications du processus de conception, le modèle principal et les utilisateurs.

Pour les fins du présent travail sur l'adoption de l'informatique par les architectes et considérant la recherche sur les langages qui est présentée dans la dernière partie de cette thèse, je limite à ce stade-ci le regroupement sur la modélisation des solides aux systèmes B-rep et CSG. Il faut aussi relever que certains auteurs soulignent que les représentations par frontières (b-rep) et volumiques (CSG) sont accompagnées par un troisième type de représentations que J.D. Foley appelle par balayage (1994). Cette classification est aussi plus proche des préoccupations de l'architecte que de l'informaticien. Pour tenir compte du fait que la modélisation des solides consiste dans la représentation des formes et des opérations sur celles-ci pour des fins de figuration, tout en soulignant que le solide est un objet physique tridimensionnel possédant une forme délimitée par une frontière qui délimite des volumes extérieurs et intérieurs.

En décrivant les représentations par balayage, J.D. Foley les classe comme des représentations par frontières et volumiques. Les premières représentations décrivent les solides par les frontières (b-rep) et les deuxièmes les décrivent comme une combinaison de primitives volumiques. Cette deuxième catégorie comprend deux groupes : un constructif (CSG) où le modèle est construit en assemblant les composants, l'autre descriptif (*octree*) qui décompose l'espace de l'objet en une collection de solides contigus et qui ne s'intersectent pas parce que ces solides sont des primitives volumiques qui ne sont pas nécessairement du même type que l'objet décomposé. Cette dernière catégorie est une variante hiérarchique du modèle Voxel qui est aussi appelé

spatial occupancy enumeration model et qui consiste à représenter l'objet en le décomposant en cellules.

Finalement, le solide dans un modèle *voxel* est représenté par un ensemble ou une liste de cellules spatiales, appelées voxels, occupées par le solide : il s'agit d'une description locale et non globale d'un objet et d'une approximation de l'objet par cellules. Le modèle *octree* est un modèle *voxel* où les cellules sont des cubes, mais qui n'ont pas tous la même taille ce qui permet une économie de la place mémoire ; son avantage, du point de vue informatique, est qu'il se prête bien à des représentations multi-résolutions. (Foley, 1994 ; Popov, 1998) (Figure 65)

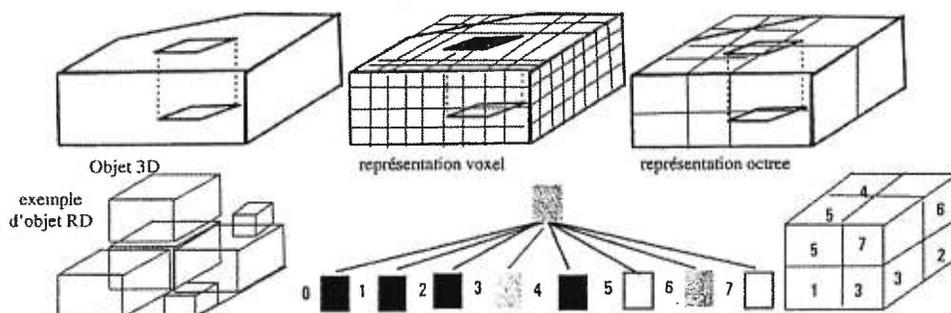


Figure 65. Exemple d'objet 3D et de sa représentation voxel et octree (V. Popov, 1998)

Chapitre 8 La recherche sur les méthodes de travail des architectes

Comment l'architecte peut-il tirer parti de la CAO considérant qu'il a développé un langage et des méthodes de travail adaptés à la représentation bidimensionnelle? Telle est la question principale de cette thèse. Pour répondre à cette question qui s'intéresse à la fois à la conception en architecture et à la relation concepteur-machine, je me suis penché sur les méthodes de travail des architectes, par une étude de cas, visant deux objectifs :

- comprendre comment se conjugue la capacité d'anticiper une organisation matérielle de l'espace et un processus de collaboration entre les acteurs dans le processus de décision ;
- identifier, chez les architectes, des attitudes communes lors de la conception assistée par ordinateur.

Le premier objectif est lié à la connaissance de l'environnement informatique pendant que le deuxième objectif est lié à l'adoption de l'outil informatique et à l'identification de certains blocages de la part des architectes, tout particulièrement pendant la première phase de conception. (Figure 66)

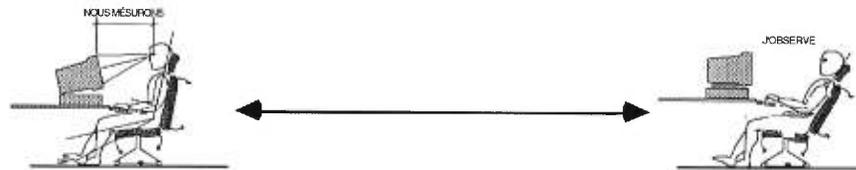


Figure 66. Les méthodes de travail des architectes en CAO : la mesure ou la compréhension du modèle

Avant de procéder à l'étude de cas proprement dite et pour atteindre le premier objectif, j'ai effectué un pré-test : l'observation de deux sujets, concepteurs et architectes, l'un possédant les connaissances nécessaires à la manipulation d'un logiciel dit de CAO, l'autre pas. Il s'agissait d'observer comment se comportent les concepteurs confrontés à l'utilisation d'un logiciel d'aide à la conception. Cette observation préalable fait partie de la conceptualisation du problème de recherche, en ce qu'elle permet de mieux le définir en vue de créer un modèle théorique qui, à la lumière des recherches

sur la conception, la communication et le traitement de l'information, puisse permettre de comprendre et d'expliquer des blocages face à l'outil informatique pendant la toute première phase de conception.

Ce que j'ai tenté de faire c'est de faire ressortir la discordance entre une possible explication du pourquoi de ces blocages et la réalité observée. «Toute recherche, analyse ou étude a comme point de départ une situation perçue comme problématique, c'est-à-dire qui cause de l'inconfort et qui, par conséquent, exige une explication. Cette situation problématique survient lorsqu'il y a un écart entre la conception ou l'explication d'un phénomène et l'observation ou la perception de la réalité. C'est cet écart qui est à l'origine du problème de recherche». (Contandriopoulos et al., 1990) Ce pré-test a été, comme le dit Fortin, une interrogation explicite relative à un problème à examiner et à analyser dans le but d'obtenir de nouvelles informations. (Fortin et Rousseau 1989)

Donc, ce pré-test, a permis d'identifier les variables à retenir pour la recherche proprement dite. Le choix des deux sujets a été fait au hasard parmi un groupe d'élèves, architectes et concepteurs, dans un cours que je donne sur le dessin et la conception assistés par ordinateur et ne visait pas à généraliser les résultats de l'observation.

A.Ouellet, nous rappelle que «un des buts de la science consiste à expliquer les événements et les comportements. L'étape de la description doit cependant précéder celle de l'explication». (1981, p. 28) Selon la nature de l'investigation, cette description sera qualitative ou quantitative ou les deux. Il souligne que les recherches consistent souvent à décrire les phénomènes et à reconnaître leur complexité et qu'on doit tenter de les décrire dans le détail avant de les expliquer. En effet, une explication scientifique s'appuie sur une démonstration qui permet de lier un phénomène à une loi générale ou à des principes qui ont déjà été vérifiés, par des systèmes explicatifs et une logique. Ce qui amène les scientifiques à construire des méthodes basées sur des théories ou des modèles, pour expliquer le phénomène observé.

Dans notre cas, il n'est donc pas suffisant de dire que l'outil ordinateur ne peut pas «concevoir» pour expliquer les blocages des architectes dans l'utilisation de l'ordinateur comme outil d'aide à la conception. Et nous ne pouvons pas justifier cette affirmation uniquement par nos impressions. Nous avons besoin de compléter le processus d'induction qui consiste à observer et accumuler des faits, par un processus qui découvre

et étudie les interrelations qui lient les faits étudiés. Selon A. Ouellet, «aujourd'hui, plusieurs chercheurs (Delalre, 1974 ; De Rosnay, 1975 ; Le Moigne, 1977 et Crozier, 1977) ont constaté la pauvreté de la méthode scientifique pour prendre des décisions éclairées et en conséquence, ceux-ci suggèrent de la compléter par la méthode systémique». (1981, p. 35) Cette approche est, selon De Rosnay (1975), une méthode d'organisation des connaissances qui permet de rendre l'action plus efficace, contrairement à l'approche analytique, parce qu'elle englobe non seulement tous les éléments d'un système, mais aussi les liens dialectiques entre ces éléments. En effet :

«L'approche analytique cherche à réduire un système à ses éléments fondamentaux constitutifs et conçoit l'ensemble comme une addition du caractère des unités selon les principes d'un strict déterminisme. Les lois d'additivité des propriétés ne valent plus dans le cas de systèmes complexes constitués d'un grand nombre d'éléments variés, joints par des fortes interactions. L'approche systémique permet d'englober un système dans sa totalité, sa complexité et sa dynamique. En effet, appliquer une théorie simple, qui, de par sa nature, exclut le compliqué, l'ambigu, le paradoxe ou l'incertain dans des phénomènes complexes, revient à faire de la simplification au moyen de schémas simplistes.» (1981, p. 36)

Ce qui revient à dire qu'il est important, lors d'une recherche sur l'individu en interaction avec l'environnement, de ne pas rejeter le complexe, parce que difficilement simplifiable.

En conclusion, la construction d'un modèle s'appuie sur les observations des faits et des chroniques statistiques, selon les cas, en cherchant les liaisons fonctionnelles entre les observations, pour faire ressortir certaines périodicités ou décalages entre les événements observés et enfin constater certaines similitudes. C'est ce que A. Ouellet appelle modéliser : «concevoir puis dessiner une image à la ressemblance de l'objet» (1981, p. 38) et que Le Moigne (1977) définit comme le passage du morphologique au fonctionnel. (Figure 67)

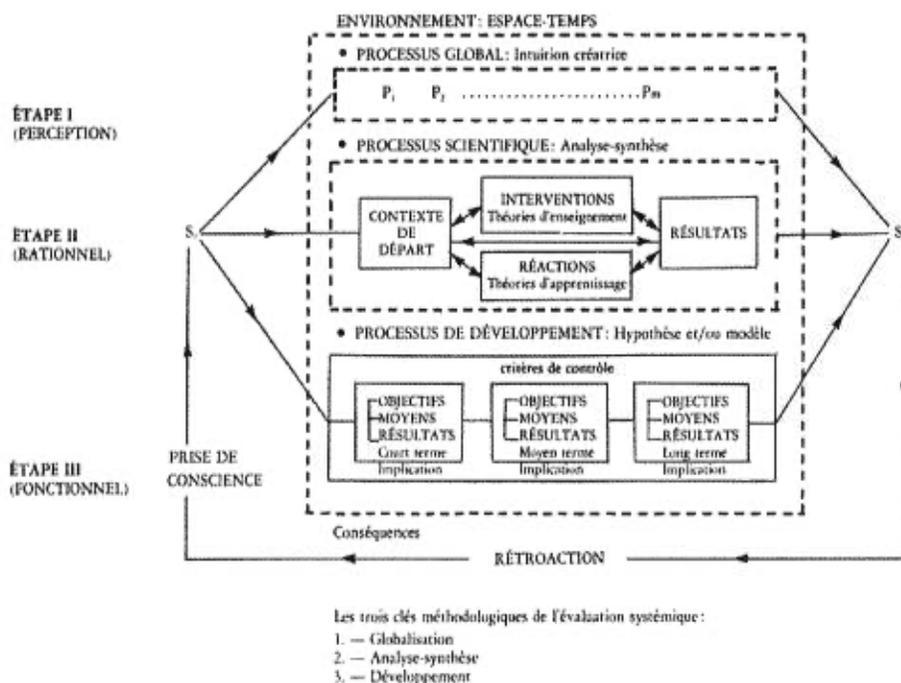


Figure 67. Schéma du modèle systémique d'évaluation (A. Ouellet, 1981, p. 44)

8.1 Description du pré-test

L'objectif de ce pré-test a été d'observer, de décrire et d'expliquer si, pendant la réalisation par ordinateur d'un modèle, deux sujets travaillaient d'une façon différente selon leurs niveaux de connaissances du logiciel, et de comprendre les liens dialectiques entre le concepteur et l'outil.

Lors de cette observation j'ai, plutôt que de chercher une relation causale, préféré avoir une vision d'ensemble des facteurs qui jouent pendant la réalisation d'un objet pré-conçu, en essayant de dégager des variables me permettant de mieux comprendre le problème d'adoption de l'outil pour mieux orienter l'étude de cas.

Comme instrument de mesure, j'ai choisi un logiciel de CAO¹ de type commercial, distribué à petite échelle pour concentrer l'observation sur les tâches de construction d'un objet et, si possible, réduire les erreurs d'interprétation provoquées par le type d'instrument, sachant que le type d'instrument choisi peut provoquer des biais qui affectent la validité d'une recherche. (Passini, 1995) Ce logiciel transmet à l'écran une représentation filaire pour améliorer la rapidité de traitement de l'information, et il permet en tout temps une représentation des surfaces avec choix d'éclairage et de couleurs. Il doit être classé parmi les logiciels de type surfacique.

Les recherches dans le domaine de l'analyse et de l'évaluation géométrique et psychologique de la représentation spatiale, et tout particulièrement les travaux de P. Mongeau qui dans sa thèse de doctorat présentait les résultats de ses recherches sur la perception spatiale, ont permis de comprendre et de préciser le concept de représentation spatiale définie comme un codage d'informations relatif à l'espace et aux images intellectuelles qu'un individu se fait du monde et des objets qu'il perçoit. (1989, p.1) Par ailleurs, cette notion de «représentation spatiale» a été précisée et redéfinie par plusieurs chercheurs et P. Mongeau nous en fait une liste non exhaustive, mais suffisamment significative :

- «une réflexion de l'espace dans l'esprit des hommes (Shemyakin, 1962) ;
- la réflexion mentale interne et symbolique d'une action spatiale (Piaget et Inhelder, 1967) ;
- une production mentale d'un objet en pensée (Laurendeau et Pinard, 1970) ; la reconstruction de l'espace en pensée (Hart et Moore, 1971) ;
- l'habileté à engendrer, retenir et manipuler une image spatiale abstraite (Lohoman, 1982) ;
- un processus d'entreposage et de traitement d'informations spatiales (Kosslyn, 1983) ;
- la capacité d'intérioriser de façon qualitative un modèle spatial par l'analyse et la synthèse de ses propriétés géométriques et d'effectuer des opérations mentales sur ce modèle.» (Baracs, Pallascio, 1984 ; Mongeau, 1989 p. 3)

Mongeau nous dit qu'à la lecture de ces définitions on peut dégager des pôles importants de l'évolution de la notion de représentation spatiale où le sujet passe d'une position de capteur à celle de «traiteur» de l'information pour élaborer une image interne qui soit en correspondance analogique avec le monde extérieur. Les résultats de ces recherches et les tests psychométriques présentés pour évaluer le développement de la

¹ Il s'agit de la version 2.6.3 du logiciel de modélisation *Exception*, conçu et commercialisé par José Herrando, Montpellier, France, 1995, et utilisé à l'École d'architecture de Montpellier en France et au Département de technologie de l'architecture du Cégep de Saint-Laurent au Québec.

perception spatiale ont permis à l'auteur de constater que les aspects topologiques, projectifs et affines sont ignorés au profit des aspects métriques :

«Les aspects topologiques correspondent principalement aux propriétés d'adjacence et de connexivité des structures spatiales, lesquelles sont conservées suite à une ou des déformations continues : tel que l'étirement, le rétrécissement, le pliage et la torsion. Les aspects projectifs correspondent principalement aux propriétés d'incidence des droites et des plans ; lesquelles sont conservées suite à une projection centrale. Les aspects affines correspondent principalement aux propriétés de parallélisme et de convexité ; lesquelles sont conservées suite à une projection parallèle. Les aspects métriques correspondent principalement aux propriétés de distance et d'angle.» (Mongeau, 1989, pp. 3-4)

8.1.1 Description de l'expérience et méthodologie

L'observation a été faite pendant le cours de dessin et de conception en architecture au Département de technologie de l'architecture du Cégep de Saint-Laurent, cours que je donne depuis plusieurs années à des étudiants futurs technologues en architecture ou architectes et concepteurs qui désirent perfectionner leurs connaissances sur des outils informatiques disponibles sur le marché. Ce cours¹ a comme objectifs :

- d'apprendre à exploiter les fonctions avancées des logiciels de CAO-DAO appliqués à l'architecture;
- d'apprendre à utiliser plusieurs logiciels de CAO-DAO architectural dans les environnements Macintosh et DOS ;
- d'être informé des plus récents développements en CAO-DAO appliqués à l'architecture.

Après avoir fait une enquête auprès des étudiants sur leurs expériences professionnelles et leurs connaissances du logiciel utilisé, j'ai choisi d'observer, au hasard, deux personnes : une avec une expérience préalable du logiciel et l'autre sans, tout en demandant aux autres étudiants de faire la même expérience. L'observation a porté sur les méthodes de travail, les temps d'apprentissage des commandes et de réalisation du modèle. (Crad et al., 1983)

¹ Ce cours a été créé à la fin des années quatre-vingts pour répondre aux exigences du nouveau programme en Technologie de l'architecture (1988).

Chaque observation a été mesurée et lors de l'observation de l'exécution de la tâche (temps d'apprentissage et de réalisation), j'ai utilisé une échelle de mesure ordinale où les gestes étaient évalués par des valeurs (beaucoup, assez, un peu). La fiabilité de ces mesures est liée à l'observateur et à ce propos, je souligne que la mesure n'est jamais meilleure que l'observation empirique. (Passini, 1995, p.26) Enfin, les travaux des étudiants non ciblés ont servi d'aide à l'interprétation.

Le modèle (Figure 68) que les deux sujets devaient réaliser était composé d'un nombre limité d'objets, ce qui a réduit le temps d'exécution et a permis de concentrer l'observation sur la mise en place d'une méthode de travail et sur l'organisation de la tâche à accomplir.

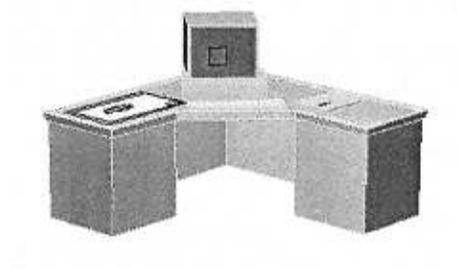
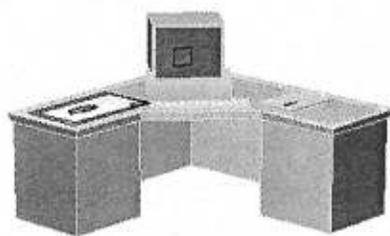


Figure 68. le modèle à reproduire

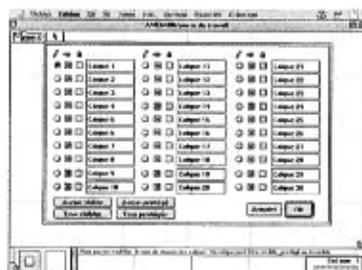
Plusieurs objets devaient être placés dans l'espace : l'ordinateur, la tablette graphique, etc., pour permettre l'observation des choix d'exécution pour les déplacements horizontaux, verticaux, les rotations des objets et les séquences. (Figures 69 et 70)



Observation du modèle



Choix des outils (icônes) pour la réalisation



Choix des couches



Choix de la trame et du calage

Figure 69. Observation de la mise en place d'une méthode de travail



Après des essais en 3D choix des outils en 2D et construction du modèle



Déplacements et visualisation en 3D



Projet final (6heures de travail)

Figure 70. Observation de l'exécution de la tâche (temps d'apprentissage et de réalisation).

Comme le souligne V. Arès (1993), dans sa thèse de doctorat sur l'évolution de la notion de méthodologie et sur la distinction que Lakatos propose entre l'heuristique et la méthodologie, les démarches philosophiques qui amènent à faire la distinction entre la méthodologie et l'heuristique que l'auteur définit comme «la logique des découvertes», mettent en évidence les sérieuses difficultés qui vicient la méthodologie de certaines méthodes d'observation.

Dans un test comme celui que je présente ici, il est important d'élaborer une approche qui élimine la tentation de tomber dans les filets du relativisme et du scepticisme. (Arès, 1993) Pendant les observations, j'ai adopté une attitude épistémologique qui rappelle la «réfutation» de Popper pour qui la scientificité d'une théorie réside dans la possibilité de la réfuter. Il est clair que cette expérience ne fait pas appel à une théorie scientifique, mais il est important de présenter l'approche choisie qui se situe parfois à la frontière de l'attitude positiviste et souvent en transition vers le constructivisme.

La validation de cette démarche qui prend naissance dans l'interprétation proposée par V. Arès où la théorie interprétative repose sur la compréhension plutôt que l'expérimentation : cette démarche nous donne une appropriation globale, structurée de la question qui est posée pour réfléchir sur des actions ultérieures. Pour mieux saisir cette démarche, je rappelle aussi les propos de Bachelard : «les faits et les idées s'influencent réciproquement, avancent ensemble cahin-caha. Ainsi marche la connaissance, d'un pas d'écrevisse vers un but indéfini».

Enfin, il est important de souligner que la question qui a orienté ce pré-test : comment se comportent deux personnes confrontées à l'utilisation d'un logiciel de CDAO? est liée au processus de réalisation du modèle et non à sa conception. Ce choix délibéré m'a permis de mieux concentrer l'observation sur l'outil et le concepteur. L'individu réfléchit devant une commande et cherche le chemin logique pour obtenir son résultat. Dans ce cheminement, le concepteur est en lien direct avec la machine. C'est l'éventualité qu'une connaissance des logiciels par les utilisateurs puisse influencer leur comportement qui m'a amené à m'orienter vers ce type d'observation en vue de définir les principaux éléments d'un problème ou d'une situation et afin d'identifier des variables qui doivent être retenues dans une expérience. (Passini, 1995)

8.1.2 Analyse des résultats

L'observation des tests effectués par les deux sujets fait ressortir certaines constatations. Avant tout, les deux sujets ont suivi, pour atteindre leur objectif, deux chemins complètement différents. Il est à noter, à ce propos, que plusieurs recherches soulignent qu'une connaissance préalable des techniques de gestion des couches, utilisation des trames magnétiques, etc. définit par elle-même une façon de travailler. Cette constatation montre l'importance d'observer la variable «connaissance de l'outil».

La construction des objets, après quelques essais en 3D, a été réalisée par les deux sujets en utilisant les projections orthogonales 2D. Ce constat souligne un point très important de la conception des logiciels : la reproduction par ordinateur des méthodes traditionnelles de représentation avec, comme résultat, l'impression sur papier des dessins exécutés à l'écran. J'ai pu corroborer à plusieurs reprises dans les travaux des étudiants que le résultat final, la sortie sur table traçante, est le moment le plus important de leur travail et que cela amène les sujets à privilégier les outils 2D et à utiliser les outils 3D seulement pour la visualisation. Cette constatation montre l'importance d'observer la variable «média de production».

Presque toutes le fois que les deux sujets ont exécuté une commande, il ont dû la répéter plusieurs fois et cette attitude a persisté tout au long du travail. Par contre plus l'exécution du projet avançait, plus les deux personnes utilisaient la même approche et le même temps pour l'exécution des tâches. Et rarement les deux sujets ont fait appel au manuel ou au tutoriel. Le sujet n'a donc probablement pas besoin d'avoir au préalable une formation pour apprivoiser un logiciel, mais il est important qu'il ait une connaissance des méthodes pour la «mise en place» du dessin : choix des couches, organisation en objets, etc.

Enfin ce pré-test, m'a permis de me sensibiliser à deux facteurs liés au logiciel :

- l'importance de l'architecture du logiciel qui permet la construction des objets ; le designer ne doit pas être «distrainé» par la recherche d'outils : palette graphique, ou autre ;

- la flexibilité du logiciel qui permet l'exportation-importation et la gestion de l'information avec d'autres logiciels et environnements informatiques ; le designer est en continuelle recherche d'informations, croquis, photos exemples, qui ne sont pas liés numériquement à l'objet en création.

Cette constatation montre l'importance d'observer la variable «structure logicielle des programmes utilisés».

Pour terminer, je rappelle à nouveau que les deux personnes étaient déjà en possession de l'esquisse du projet et qu'elles n'étaient pas du tout en situation de conception avec l'ordinateur. Ce pré-test avait une fonction heuristique et il a servi à aider la définition des variables pour l'étude de cas.

8.2 L'étude de cas

Depuis les années quatre-vingts, les concepteurs ont été confrontés à l'utilisation de l'informatique, mais contrairement à d'autres professionnels les architectes ont tardé à se l'approprier. Par exemple, selon les études de l'Institut Royal d'Architecture du Canada en 1983, seulement 26% des architectes aux États-Unis et 12% en Europe, utilisaient l'ordinateur et leur emploi était presque totalement réservé au devis et ou au dessin technique. (Banz et Fournier, 1983, p. 11) L'Ordre des architectes du Québec procédait au même genre d'enquête dans les années 90 pour montrer que les architectes qui utilisaient l'ordinateur le faisaient seulement à des fins de réalisation des dessins techniques du bâtiment et de traitement des données. À l'aube de l'an 2000, la présence de l'outil informatique dans les bureaux est finalement bien ancrée, mais toujours et seulement pour le dessin technique et la réalisation de plans ou, tout au plus, dans les dernières années, pour les images de synthèse qui sont souvent un substitut des dessins de présentation en axonométrie.

Et cela parce que, comme nous l'avons déjà montré précédemment, c'est quand l'architecte est en situation de résolution de problèmes bien définis qu'il peut faire appel à l'outil informatique. L'étude de cas visait donc à décrire et à expliquer le phénomène de l'utilisation de l'ordinateur et à étudier les variables qui permettront d'identifier les blocages dans l'adoption de cet outil.

Dans un processus global d'évaluation de fonctionnement d'un modèle, selon A. Ouellet, «le «perceptif» constitue la problématique du début de l'évaluation, telle que perçue par les personnes...». C'est à ce stade que les personnes impliquées dans la situation problématique d'évaluation émettent leurs idées et leurs opinions. C'est ce qu'on appelle le niveau des hypothèses globales. Cela pour arriver à un consensus acceptable qui respecte les besoins de chacun. Et «lorsque les hypothèses globales concernant la situation à évaluer sont émises, il faut retenir, choisir, celles qui sont les plus pertinentes et qui ont le plus de relations avec le problème de l'évaluation, le système de valeurs et le langage des sens». Finalement, il faut construire un modèle qui permette de dégager des variables d'états (ensemble d'éléments) et d'identifier des types particuliers de variables. (1981, pp. 44-45)

Après avoir identifié les variables à observer, il s'agissait donc d'observer pendant une certaine période un groupe d'architectes en phase de conception, en portant une attention particulière à l'interaction avec l'outil informatique.

8.2.1 Définition des variables

Les observations du pré-test ont aidé à mieux définir un certain nombre de variables indépendantes, c'est-à-dire des variables qui représentent un aspect de l'environnement informatique que l'on étudie :

- la connaissance de l'outil en DAO-CAO ;
- le média final de production ;
- la structure logicielle des programmes utilisés.

Le processus de conception, comme c'était le cas lors de mes premières observations sur la façon dont les architectes créent leurs règles de fonctionnement, avec ou sans ordinateur, est considéré comme variable dépendante, la variable que nous observons et qui permet de vérifier les changements produits par la manipulation des variables indépendantes. Cette observation doit permettre de tester mon intuition voulant que les programmes utilisés par les architectes n'accomplissent pas de tâche de conception, mais plutôt de réalisation ou de modélisation de l'objet, et que leur

«architecture» est la cause des blocages dans l'adoption de l'outil informatique. Selon A. Ouellet :

«Dans toute recherche expérimentale, l'expérimentateur manipule certains facteurs ou comportements et observe en quoi le comportement des sujets étudiés est modifié. La manipulation est délibérée et systématique. Il doit donc être conscient des autres facteurs ou variables qui peuvent avoir une influence sur les résultats observés et les contrôler afin qu'on ne puisse douter de la validité de la relation fonctionnelle présentée.» (1981, p. 140)

Il s'agit en fait, comme le rappelle Van Dalen (1966) dans *Understanding Educational Research*, de mettre en évidence une relation fonctionnelle entre les variables étudiées, ce qui est la fonction principale de l'expérimentation.

J'ai procédé à cette étude de cas en m'inspirant des méthodes de recherche de Piaget sur l'expérimentation et sur la déduction. Piaget nous rappelle que «la tendance naturelle de l'esprit est d'intuitionner le réel et de le déduire [...] la lecture de l'expérience n'est jamais une simple lecture, mais suppose une action sur le réel». (1970, p. 43)

Je me suis aussi basé sur le schéma général de recherche de l'objet par simulation graphique de J.-C. Lebahar :

«Notre préoccupation porte principalement sur le système de résolution de problème qui caractérise toute une dimension de l'activité humaine. Ce système est un complexe de sous-systèmes tous plus subtils les uns que les autres. Il est la combinaison productive de l'intelligence et de la compétence. La première correspond à la conception de Piaget de l'intelligence¹ [...] La compétence, c'est la connaissance architecturale dont dispose un architecte donné.» (Lebahar, 1983, p. 68)

Après avoir identifié les variables à observer j'ai procédé à la mise en place d'une méthodologie pour l'observation des sujets et développé un modèle théorique. Si nous devons définir une théorie, nous pouvons dire qu'il s'agit d'une explication systématique des phénomènes observés ou des théories qui s'y rattachent. Dans ce cas, plutôt que de

¹ C'est la conception qu'a Piaget de l'intelligence telle qu'elle est décrite par P. Vermersch, dans «*La théorie opératoire de l'intelligence appliquée aux adultes*», Éducation permanente, N. 51, Paris, 1979, pp.2-29.

parler de théorie, nous parlerons de modèle théorique pour proposer une solution au problème de recherche.

8.2.2 Description de l'étude de cas et méthodologie

Le choix des candidats qui ont participé à l'étude a été fait au hasard de mes connaissances dans le milieu de l'architecture et à la suite de rencontres et discussions informelles avec des architectes qui travaillent en utilisant couramment l'ordinateur. La démarche suivie a été d'observer le comportement des sujets, de prendre des notes et parfois d'interroger. Le choix des cas à étudier s'est arrêté sur six collègues :

- 1) architecte, concepteur de petits bâtiments et restaurateur, il utilise les outils informatiques depuis 1987 ;
- 2) architecte, concepteur de petits et gros bâtiments, il n'utilise l'informatique que pour les calculs et les textes depuis 1995 ;
- 3) architecte et ingénieur, concepteur de petits bâtiments et designer, il utilise l'informatique depuis 1987 ;
- 4) architecte et technicien en architecture, concepteur de petits bâtiments et professeur, il utilise l'informatique depuis 1992 ;
- 5) architecte et designer, concepteur en design d'intérieur, il utilise l'informatique depuis 1991 ;
- 6) architecte, il utilise l'informatique depuis 1992.

Compte tenu de l'objectif de la recherche, l'étude de cas est apparu d'emblée la méthode la plus indiquée. En effet, contrairement à l'approche expérimentale qui exige une technique d'échantillonnage et un cadre d'expérimentation où les candidats auraient dû être placés dans un mêmes environnement en utilisant les mêmes outils, l'étude de cas se base sur l'observation directe des sujets dans leur environnement professionnel, tout en se référant à un modèle qui lui permette d'évaluer l'adoption de l'outil informatique par un processus perceptif, rationnel et fonctionnel.

La première partie de l'étude de cas a consisté à demander aux six participants de présenter à leur façon l'approche utilisée pour la conception de leurs travaux avec les outils informatiques. Il s'agissait d'écouter, chaque projet a été présenté par l'architecte

qui a illustré, par des exemples, les tâches exécutées, et d'observer les remarques des sujets sur le succès-échec dans l'adoption de l'outil informatique. Par la suite, j'ai construit des regroupements des types de réponses.

Par la suite, et pendant une période variant de six mois à un an, selon les cas et le type de projet, j'ai suivi les activités professionnelles des collègues. J'ai observé les changements dans l'utilisation des outils de travail et le recours à l'informatique par rapport à d'autres outils, par exemple le dessin sur papier. J'ai enfin assisté, dans certains cas, à des présentations de projets pour observer les attitudes des participants spécialistes et non spécialistes. Cette partie de l'observation ne comprenait pas la phase de conception proprement dite, mais elle devait permettre d'évaluer l'adoption de l'outil tout au long de la phase du projet.

Tout au long du processus d'observation, j'ai été attentif au comportement des professionnels face à l'ordinateur, indépendamment du type de logiciel utilisé et de ses caractéristiques. Il ne s'agissait pas d'un banc d'essai pour évaluer les performances techniques des outils. À ce propos, à la fin des années 80, j'avais déjà procédé, pour le ministère de l'Éducation du Québec, à une étude sur les logiciels de CAO-DAO alors disponibles.¹ Et les résultats de cette recherche avaient indiqué que les études devaient être dirigées vers les besoins de l'utilisateur plutôt que vers les performances de l'outil. (De Paoli, 1988)

Pour assurer un meilleur suivi des activités de travail des professionnels, j'ai rédigé des modèles de questions qui ont été soumises à plusieurs personnes pratiquant dans le domaine de la conception assistée par ordinateur, pour en retenir cinq. Ces questions ont été le point de départ des entrevues et elles se sont enrichies ou ont été modifiées pendant les rencontres par l'écoute des explications sur les projets réalisés par les sujets.

Liste des questions retenues :

¹ L'objet de rapport concernait l'essai, l'examen et la manipulation de logiciels de CAO et de DAO sous deux point de vue :

- utilisation professionnelle
- utilisation pédagogique de l'outil. (De Paoli, 1998)

- Lors de la première phase de conception faites-vous une esquisse à la main ou à l'ordinateur?
- Avez-vous déjà emmagasiné par des méthodes numériques vos travaux d'architecture pour les utiliser comme «image» de départ pour des travaux subséquents?
- Avez-vous une connaissance des méthodes de travail en DAO-CAO ? Et si oui décrivez votre méthode de travail.
- Le média final de production est-il important? Utilisez-vous comme média de présentation d'autres outils que les imprimantes ou les tables traçantes?
- Avez-vous déjà fait ou déjà pensé à «programmer» vos logiciels ou à en personnaliser un?

Pendant l'observation, j'ai précisé mes intentions sur le type de connaissances que je voulais en tirer aux niveaux perceptif et rationnel. Il s'agissait alors de peaufiner mes observations pour proposer une piste de solution qui puisse valider mon hypothèse de départ : la pleine exploitation de la relation concepteur-ordinateur va de pair avec un changement radical du langage pour la figuration.

Les études de cas permettent de mieux consolider les concepts développés dans la problématique et elles permettent aussi de tirer des conclusions à partir d'un ensemble de cas, lorsque le même phénomène (attitude des concepteurs) se produit dans différentes situations (prise de décision, résolution de problèmes). Ce qui permet d'avoir une meilleure vision du processus d'appropriation de l'outil informatique par le concepteur pour corroborer, par l'expérience empirique directe, certaines déductions théoriques. (Lakatos, 1984)

J'ai voulu comprendre le phénomène dans son contexte, c'est-à-dire dans le milieu de travail. L'approche privilégiée, axée sur la relation concepteur-machine et non seulement sur l'outil visait à identifier des attitudes qui permettent de comprendre comment l'outil informatique choisi est adopté et maîtrisé par le concepteur et de comprendre aussi les blocages.

Cette étude a permis de cerner des aspects importants dans l'utilisation de la CAO et elle a permis, pendant les entrevues, de comprendre l'approche «informatique» des concepteurs, tout en tenant compte de leurs expériences, de leur façon d'agir et de leurs habitudes. Comme le souligne R. K. Yin : «le besoin d'utiliser des études de cas

survient lorsque : une enquête empirique doit examiner un phénomène contemporain dans son contexte réel, spécialement quand les frontières entre le phénomène et le contexte ne sont pas clairement évidentes». (Yin, 1981, p. 98)

8.2.3 Analyse des résultats

Tout au long des observations s'est concrétisée une vision de la conception qui repose sur ce que P. Chupin appelle le «constat empirique d'un processus d'exploration dans lequel s'effectue un dialogue réflexif avec la situation» qui «met en évidence un déclencheur à l'origine d'un processus heuristique» et qui «contredit les représentations du processus qui commencent par une spécification exhaustive du problème». (1998, p. 93)

L'architecte s'impose un objectif initial qui dépend beaucoup plus de sa vision et de ses valeurs que d'un raisonnement rationnel, comme le soulignait déjà J. Darke (1978) qui avait à l'époque procédé à des études de cas sur les méthodes de travail des architectes.

Mes observations corroborent les études de J. Darke. En effet j'arrive aux mêmes constats : le concepteur, au tout début de la conception, ne commence pas par l'analyse exhaustive, au contraire, le concepteur essaye plutôt de voir le problème qui est encore mal défini, pour présenter des solutions cognitivement manipulables et non nécessairement objectives et logiques. C'est ce que J. Darke appelait le *primary generator in the design process*.

Par la suite, j'ai pu constater que chaque sujet avait une attitude différente dans la méthode à utiliser pour mener le projet jusqu'à sa réalisation et qu'il y avait autant de façons de faire que de sujets. J'ai pu, en faisant appel aussi aux études de R. Prost sur la conception architecturale (1992), ressortir quatre modèles : (Figure 71)

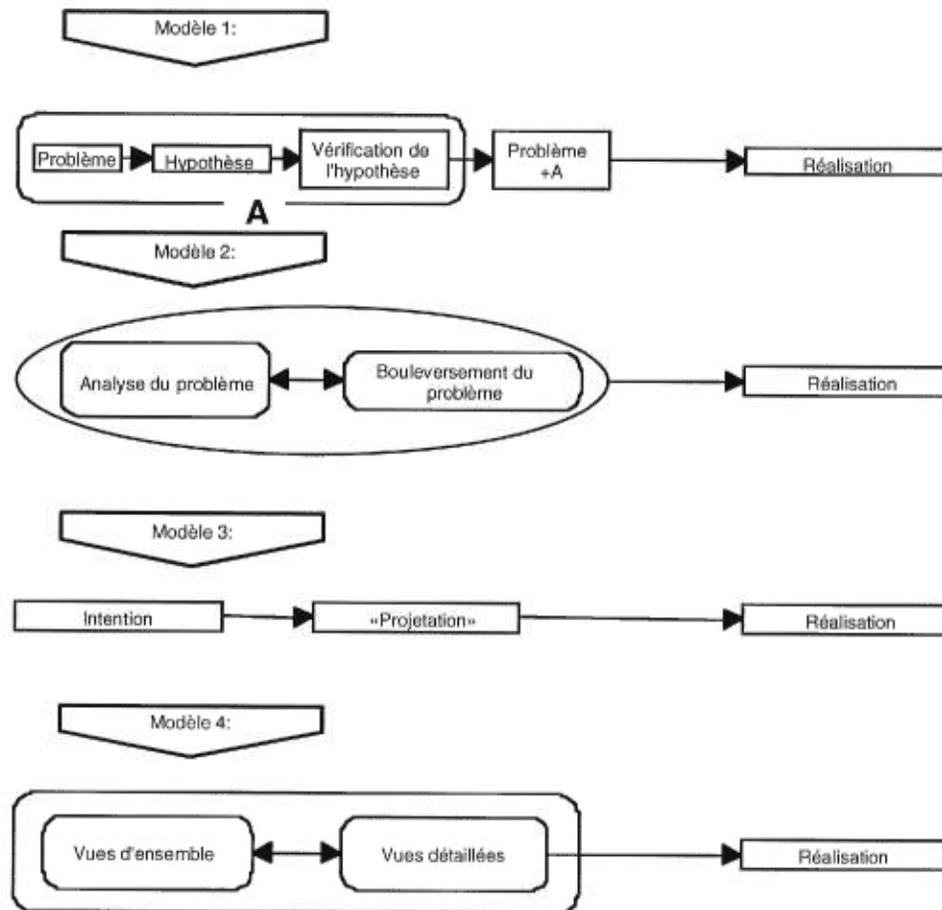


Figure 71. Modèles de traitement du problème en conception architecturale

Enfin, les réponses aux questions formulées lors des entretiens, ont fait ressortir que tous les sujets, lors de la première phase de conception, font une esquisse à la main sans l'aide de l'ordinateur.

Les méthodes de travail avec les outils informatiques étaient différentes selon les sujets et selon les projets et il n'est pas possible d'identifier des attitudes communes, même dans le cas des sujets qui avaient des connaissances théoriques des méthodes d'utilisation des logiciels de CAO-DAO. Chaque fois, les architectes ont développé leur «conception» avec des méthodes de traitement de l'image et du modèle qui ont été modifiées après chaque étape du projet.

Ces attitudes ont été aussi constatées dans les recherches menées par une équipe du département d'architecture de l'Université de Sydney et présentées à la conférence de CAADRIA99. En effet, dans un article *Evaluating the Complexity of CAD Models in*

Education and Practice, P. Murty souligne que lors de la conception avec des outils de conception assistée par ordinateur «*a frequent culmination of computer aided design teaching is the self-directed project, for which a student produces a CAD drawing or model*» et que chaque étudiant ou nouvel utilisateur développe une stratégie propre pour produire et visualiser le modèle. Et il ajoute que «*design complexity is the more popular indicator of manual drafting task magnitude, because it is visible before work commences*». (1999, p. 105) Enfin P. Murty souligne, pour expliquer ces approches, non seulement la complexité des méthodes de travail avec les outils d'aide à la conception, mais aussi la présence des propriétés des objets à modéliser et leur interprétation, en identifiant trois sources à l'origine de l'utilisation de la CAO : l'information contenue dans le modèle, la structure du modèle et les propriétés qui y sont attachées.

Le média utilisé dépend de manière générale du type de personnes avec qui l'architecte veut communiquer, les spécialistes et les non spécialistes. Tous les sujets affirment qu'il faut combiner différents médias pour créer les meilleures conditions de communication. En même temps, ils soulignent que le «papier» est nettement insuffisant et que, lors des productions des objets en architecture, il y a une continuelle recherche d'outils pour «expliquer» le processus de conception.

Plusieurs études, et tout particulièrement celles qui ont été présentées au 4^e Congrès Européen de la simulation d'espace et auxquelles *Architecture & Comportement* (1992) a dédié un numéro portant sur les outils de l'architecte font état de cette «quête d'outils». Dans ce congrès, les recherches de R.-J. Lawrence de l'Université de Genève montrent que la présentation d'un concept demande une participation visuelle et une participation verbale, parce que la représentation graphique d'un modèle architectural sert de référent pour les différentes phases de «négociation» avec les acteurs du processus de conception. C'est ce que McKechnie (1977) a déjà appelé une information perceptive (concrète) et conceptuelle (abstraite) ou encore statique et dynamique.

Tous les sujets sont unanimes à considérer l'ordinateur comme un puissant accélérateur de la production et peut-être de la conception. Même s'il faut souligner que les réponses sur les besoins de «programmer» ou de personnaliser les logiciels ont révélé une non connaissance du domaine informatique. Les architectes interrogés ne saisissent pas, par exemple, s'il y a une différence entre le langage de programmation du logiciel et la création de macro-commandes. Pas plus qu'ils ne saisissent la place

réservée au langage avec lequel le logiciel a été conçu. Par contre, ils expriment tous une difficulté à gérer les commandes «impératives» des logiciels et les résultats déterministes qui caractérisent la plupart des programmes.

Enfin tous aimeraient savoir «comment ça fonctionne» et sans être des experts, tous aimeraient former des groupes d'échange d'information. Ce type d'attitude, d'appartenir à un groupe qui «comprend» l'informatique avait déjà été décelé par P. Breton dans ses recherches sur l'informatique, et tout particulièrement relevé dans les résultats présentés dans son livre *La tribu informatique* :

«Appartenir à la tribu informatique semble apparemment moins une question de savoir technique que de partage de système de valeurs, moins une question de machine que de culture. La tribu ne rassemble-t-elle pas finalement tous ceux qui témoignent d'un intense engagement personnel dans l'informatique?» (1990, p. 42)

L'ensemble de ces observations permet d'identifier la structure des programmes informatiques et la gestion des opérateurs qui gouvernent les méthodes de travail des architectes et le processus de conception, comme source de blocage dans l'adoption de l'ordinateur. Ce qui confirme à nouveau mon intuition voulant que les programmes utilisés par les architectes ne répondent pas aux exigences de la conception, mais plutôt de la réalisation ou de la modélisation de l'objet et que leur «architecture»¹ est la cause des blocages dans l'adoption de l'outil informatique pendant la conception.

Conclusion

La force de cette recherche réside dans la qualité des sujets et dans la relation entre les sujets et l'observateur. Un peu comme Piaget qui a pu formuler ses hypothèses sur le développement de l'enfant en observant ses trois enfants pendant plusieurs années, la relation que j'entretiens avec les sujets est extrêmement privilégiée. Il s'agit de collègues de travail et d'amis que je connais depuis plusieurs années. Donc même si les questions et l'observation se concentraient sur la conception au tout début de ce processus, mes conclusions résultent aussi de discussions, rencontres réunions, pendant toutes mes années de pratique et d'enseignant. Le chercheur et l'objet de la recherche

¹Il s'agit ici de l'architecture interne des programmes informatiques.

sont interactivement liés et comme l'a souligné G. Guba, il n'y a plus de distinction entre ontologie et épistémologie.

L'apport de cette étude, dans le débat sur la conception, est une meilleure compréhension des types de communication susceptibles de se produire entre différents acteurs et des liens dialectiques qui se créent entre ces types de communication pendant le processus de conception :

- communications préparatoires ;
- communications pour la recherche d'une idée de solution ;
- communications relatives à la pertinence de la solution ;
- communications relatives à la technicité de la solution ;
- communications relatives à la concrétisation de la solution.

C'est une méthode heuristique qui, par l'observation, aide à trouver une réponse à la question principale de cette thèse : comment l'architecte peut-il tirer parti de la CAO considérant qu'il a développé un langage et des méthodes de travail adaptés à la représentation bidimensionnelle?

Le résultat est un enrichissement des connaissances pour «proposer» les expériences nécessaires pour dénouer les blocages lors de l'utilisation de l'ordinateur pendant la première phase de conception. Ces résultats permettent aussi de mieux montrer que l'outil n'est pas en soi la cause des blocages, mais son fonctionnement oui, et que nous devons nous pencher sur son fonctionnement pour proposer une solution au problème de recherche. Ces résultats tendent à prouver :

- que le dessin est insuffisant pour donner du «sens» au projet;
- que les architectes sont ignorants du fait informatique ;
- que les architectes ne partagent pas un corpus de méthodes et de connaissances, en agissant chacun à leur manière.

Ils permettent aussi de souligner qu'une nouvelle approche de la conception de programmes de CAO doit tenir compte avant tout du concepteur et des ses interactions avec l'ordinateur.

Cette étude de cas, je viens de le souligner, a permis d'identifier comme cause de blocage la gestion des opérateurs qui gouvernent les méthodes de travail des architectes avec l'outil informatique, elle a permis aussi d'identifier trois grandes catégories d'opérateurs:

- les opérateurs géométriques ou visibles ;
- les opérateurs sémantiques ou invisibles ;
- les opérateurs de transformation.

Cette étude a permis aussi de réaliser qu'une meilleure compréhension du langage qui décrit ces opérateurs pourrait être une piste de solution au problème d'adoption de l'outil informatique pendant la première phase de conception.

Ce n'est pas à ce stade de la recherche qu'il faut arriver à des conclusions. Cette étude de cas doit se situer dans la continuité d'une démarche qui place le chercheur dans un cadre plus vaste où les recherches exploratoires et les études de cas réunies lui permettront de valider les indicateurs identifiés dans son champ de recherche et dans sa problématique.

Finalement, l'informatique, tout en permettant à l'architecte de développer et d'appliquer de meilleures méthodes de gestion du projet architectural, n'est pas en elle-même la solution des problèmes de l'architecture. Ce développement des méthodes passe par la prise de conscience de la mission réelle de l'architecte et la définition du type de document à fournir. Et l'architecte qui travaille, avec les outils traditionnels ou en CAO, doit pouvoir migrer vers un système ouvert qui lui permette d'exploiter toutes ses connaissances de façon ponctuelle et à des moments précis, afin qu'il puisse opérer non seulement dans un espace géométrique, mais aussi sémantique.

PARTIE III : DE LA *TAVOLETTA*¹ AU *SKETCH PAD*²

Cette troisième partie de la thèse porte sur une recherche qui permettra de proposer des pistes de solution aux blocages des architectes face à l’outil informatique. La stratégie adoptée a consisté à valider expérimentalement, par des essais de conception architecturale, le modèle d’un langage de figuration commun aux acteurs. Ce modèle comprend des opérateurs géométriques et, par une approche totalement originale, des opérateurs géométriques-sémantiques qui décrivent les actions de modélisation architecturale dans l’environnement syntaxique d’un langage de programmation.

Au cours de l’observation des méthodes de travail de l’architecte avec les outils informatiques j’avais regroupé ces opérateurs sous trois grandes familles :

- les opérateurs géométriques ou visibles ;
- les opérateurs sémantiques ou invisibles ;
- les opérateurs de transformation.

Les recherches sur la modélisation ont porté jusqu’à maintenant principalement et sur les opérateurs géométriques et sur les opérateurs de transformation. Plusieurs pistes de solution à la modélisation des opérateurs géométriques et à la normalisation des opérateurs de transformation ont été depuis proposées et vérifiées. Par contre, peu de recherches proposent de nouvelles voies d’exploration pour la gestion des opérateurs que j’appelle sémantiques et qui gouvernent la première phase de conception.

¹ La *Tavoletta* (tablette) est le nom donné en italien à la tablette utilisée lors de l’expérience faite par Ser Filippo Brunelleschi en 1415 quand il réalise sa première démonstration sur la place San Giovanni à Florence, pour montrer comment construire sur une surface plane l’image d’un objet en volume. Il s’agissait d’une tablette avec un trou au centre et tenue par la main de l’observateur ; au revers de la *tavoletta* l’artiste avait peint, selon les règles de la *perspectiva artificialis*, une vue du baptistère et à l’aide d’un miroir tenu par l’autre main de l’observateur, ce dernier pouvait voir par le trou l’image du baptistère qui se réfléchissait dans le miroir. Brunelleschi démontrait, par cette expérience, «l’adéquation entre un objet et son image en perspective, en faisant coïncider une partie de l’édifice réel avec une partie de son image peinte». (Comar, 1992, p. 32-33)

² Le *Skeetchpad* (feuille de croquis), était un système de tracés de lignes en temps réel qui permettait à l’utilisateur de dialoguer directement avec l’écran de l’ordinateur au moyen d’un crayon optique. Cette expérience était faite par Ivan Sutherland en 1963 pour présenter au MIT sa thèse de doctorat portant le même nom. Le «*Skeetchpad* introduisait de nouveaux concepts : l’infographie dynamique, la simulation visuelle, la résolution de contraintes, le pilotage au crayon optique, et un système de coordonnées virtuellement infinies, pour n’en citer que quelques-uns». (Negroponte, 1995, p. 133)

Le plan d'expérimentation comporte :

- une présentation des langages pour la description des maquettes procédurales et une méthode pour les cataloguer ;
- une série d'expériences qui ensemble, nous permettent de modéliser des opérateurs géométriques et sémantiques et par la suite, d'agir sur le substrat de l'idée architecturale.

J'ai déjà souligné que le substrat de l'idée architecturale et qui a une forme tridimensionnelle est fait non seulement de matière, en plus ce substrat a des attributs tels la couleur, la transparence, les dimensions, et les «qualités» sémantiques. Il est important d'intégrer toutes ces propriétés, en inscrivant ses qualités (densité, forme, performances, ...) dans la définition même de l'objet, comme dans la nature. Mais les recherches sur l'adoption de l'outil informatique en architecture montrent que cette intégration n'est pas toujours réalisée : lors de ses premières esquisses de conception, l'architecte travaille avec une matière non encore «formée» et plus encore avec sa «culture» qui est faite de connaissances, de significations, de sémantique.

Nonobstant les dernières recherches qui s'orientent vers la problématique de l'adoption de l'outil informatique pour la «conception», il n'y a encore pas de pistes de solution «technologiquement» adéquates : le dernier congrès du millénaire *CAAD Futures99*, l'un des plus importants sur la recherche en CAO, présente des actes qui ressemblent de plus en plus à des textes philosophiques sur le «sens» du dessin pour la conception en architecture.

Les rencontres avec J.-S. Gero (1999) et son équipe du *Key Centre of Design Computing* de l'Université de Sydney, qui depuis plus d'une décennie travaillent sur la problématique de l'adoption des outils de CAO en situation de conception architecturale, et l'intérêt qu'ils ont apporté à nos expériences corroborent et renforcent les choix que je présente ici et mettent en évidence en particulier l'importance de changer de paradigme dans la pensée informatique pour que les langages ne soient pas «lus» seulement par l'ordinateur, qui pour l'instant ne peut que les «interpréter», mais aussi par le concepteur qui lui peut les «comprendre».

L'enjeu de cette expérimentation a été l'utilisation d'un langage pour la figuration qui rende compte de ces propriétés sémantiques et qui soit compris par les acteurs pour

qu'il puissent, dans un esprit de conception coopérative, participer à la figuration. Rappelons, comme le souligne P. Boudon, que le terme de figuration désigne à la fois l'acte de figurer et son résultat, la figure produite, c'est-à-dire qu'une étude de la figuration ne se limitera pas aux figures, aux dessins, mais qu'elle portera également sur leur formation. (1988, p. 5)

Le «langage» de communication et les opérateurs étant au cœur du problème, j'ai d'abord clarifié, par une recherche bibliographique, certains «points de vue» sur la question, en cherchant à saisir la dualité informaticien \longleftrightarrow architecte. J'ai par la suite exploré des langages de programmation pouvant être utiles à mon expérimentation, pour enfin étudier et proposer, avec la collaboration de chercheurs en IA, des voies de solution.

Un premier volet traite des divers travaux de modélisation, pour en extraire des opérateurs, identifier les lieux communs et les valider en tant que maquettes procédurales. Le deuxième volet traite des expériences totalement nouvelles sur la description et la définition d'opérateurs sémantiques qui ont permis de conclure à l'originalité de la proposition avancée, de valider l'hypothèse et de trouver une réponse à la question de départ.

Les résultats de ces expériences ont été présentés à quatre congrès internationaux : en Europe¹, en Asie² et en Amérique³ pour être discutés avec la communauté scientifique internationale et pour en vérifier l'approche inédite et novatrice.

Ivan Sutherland avait fait exploser l'idée de l'infographie interactive grâce au fameux *Sketchpad*, mais comme le souligne N. Negroponte, dans les dix années suivantes :

¹ *La CAO en architecture : modélisation des actions et définition des opérateurs*, à l'occasion de DESIGN97, cinquième table ronde francophone sur la conception organisé par l'INRIA Sophia-Antipolis, France, 1997

² *The Backstage of Vitruvius' Roman Theatre*, lors de CAADRIA '99, *Conférence on Computer Aided Architectural Design Research in Asia*, organisé par l'Université Tongji de Shanghai, Chine, 1999

³ *Toward an Object-Oriented Language for the Declarative Design of Scenes*, au Congrès de ACADIA 98, *Digital Design Studios : Do computer Make a Difference?*, organisée par ACADIA, à Québec, Canada, 1998

- *The front of the Stage of Vitruvius' Roman Theatre*, à l'occasion du Congrès de CAADFutures99, organisé par l'Université d'Atlanta, U.S.A., 1999

«les chercheurs ont paru se désintéresser des aspects interactifs en temps réel de l'infographie. Il ont consacré la plupart de leurs efforts de création à la synthèse d'images réalistes, sans interaction et en différé. Sutherland lui-même s'est un peu laissé distraire par le problème de la vraisemblance visuelle, c'est-à-dire le moyen de rendre une image de synthèse la plus réaliste et la plus détaillée possible. Cette recherche s'est concentrée sur des questions comme les ombres, les reflets, les réfractions et les surfaces cachées. C'est ainsi que des pièces, des jeux d'échecs et des théières magnifiquement rendues sont devenues les emblèmes de la période *post-sketchpad*». (1995, pp. 132-133)

De son côté, C. Eastman note que, après quelques essais isolés au début des années 70, la recherche s'est développée autour d'une série d'objectifs :

- la conception : afin de permettre à l'architecte de concevoir directement en trois dimensions, par la modélisation ;
- la représentation : dans le but de permettre la production des plans, coupes et perspectives ;
- la manipulation : pour permettre d'associer aux objets les attributs des matériaux, pour intégrer les analyses énergétiques, structurales et autres pendant le processus de conception. Le but étant de créer un *new design medium* beaucoup mieux adapté aux architectes. (1987)

La modélisation des solides devait amener un vrai changement des procédures du design architectural. Elle devait permettre une unification des bases de données pour une description complète du bâtiment capable de produire selon les besoins les dessins nécessaires. Mais après dix ans de recherche, à la fin des années 80, ces objectifs n'étaient pas encore atteints.

C. Eastman a voulu en étudier les causes et il est arrivé à certaines conclusions. Avant tout, il souligne que les architectes, nonobstant l'utilisation de l'ordinateur, ne dessinent pas en trois dimensions. La représentation spatiale sert de plan de masse pour démarrer le travail, mais par la suite, ce sont les plans et élévations (les projections descriptives) qui sont utilisés par l'architecte. Selon Eastman, le problème est donc plutôt normatif qu'informatique. De plus, les dessins sont reconnus comme documents légaux, contrairement à la modélisation par ordinateur.

Toujours selon C. Eastman (1987), l'architecture est complexe, la figuration doit rendre compte des liens entre plusieurs matériaux et composantes. Cette complexité,

telle qu'elle se présente aujourd'hui, ne se limite pas à la production d'un type de figuration, mais à plusieurs dont chacun fournit un moyen pour comprendre une partie du dessin et prendre une décision s'y rapportant. La manipulation d'un modèle unique est souvent encombrante, elle ne favorise pas la créativité et ne permet pas une approche inductive. Le problème majeur est d'arriver à extraire la bonne représentation pour chaque besoin.

Le simple constat pratique à l'effet que le dessin d'atelier est continuellement remanié, de la phase de conception à sa réalisation finale sur le chantier, nous démontre que cette multiplication des dessins met en cause certaines normes d'organisation pratique de la construction actuelle et finalement, que les dessins d'architecture sont de toutes façons une description incomplète du projet d'architecture.

En résumé, la modélisation solide laisse encore aujourd'hui plusieurs problèmes à résoudre dont les plus importants découlent des limites suivantes :

- une base de données géométriques ne permet pas une description complète de l'objet, à moins qu'elle définisse une matière hétérogène et des attributs ;
- le modeleur solide emmagasine les données sous forme d'entités élémentaires : sommets, côtés ou arborescences qui contiennent des primitives et des opérations booléennes. L'architecte se trouve obligé de concevoir le design de l'objet avant sa modélisation. De plus, les dessins sont trop liés à la production de l'objet pour être produits par une simple projection du modèle simulatif.

À ces problèmes liés à la modélisation, il faut ajouter que le traitement de l'information est extrêmement complexe pendant le processus de conception et que le transfert en données informatiques n'est pas résolu : la nature des problèmes architecturaux rend difficile la modélisation avec les outils actuels et finalement, la pratique graphique joue encore un rôle prédominant.

N. Negroponte, fait un bilan de santé de l'infographie après le *sketchpad*, il dit qu'avec le temps il a développé une intuition qui dit que l'aisance avec laquelle l'utilisateur peut exprimer ses idées graphiques est plus importante que la capacité de la machine à rendre ces idées sous forme d'images de synthèse d'une qualité qui surpasse la qualité photographique. Il faut, dit-il, «que l'ordinateur puisse comprendre les hésitations et les ambiguïtés typiques des premiers stades de tout processus de

conception». (1995, p. 133) Pour mieux comprendre cette problématique l'auteur a voulu suivre en temps réel et en direct le dessin fait à la main :

«Le concept clé de mon travail était de comprendre l'«intention» derrière le dessin. Si un utilisateur traçait une courbe légèrement infléchie apparemment résolue, l'ordinateur supposait qu'il la voulait ainsi, alors que la même ligne, dessinée rapidement, était peut-être destinée au départ à être une ligne droite. Ces deux courbes douces vues après coup et non pendant leur tracé pouvaient avoir exactement le même aspect. Toutefois, le comportement de l'utilisateur indiquait deux intentions complètement différentes. En outre, le comportement variait d'une personne à une autre, parce que nous avons tous notre manière bien à nous de dessiner. Il fallait donc que l'ordinateur se familiarise avec le style propre à chaque utilisateur [...]

Ce problème de reconnaissance de formes et d'objets dessinés m'a amené à réfléchir à l'infographie non plus en termes de lignes mais en termes de points. Dans un dessin, ce qui se trouve entre les lignes, ou à l'intérieur, est ce qui compte le plus si l'on veut comprendre ce que le dessin représente.» (1995, pp. 134-135)

Ces réflexions sur l'impasse de l'outil informatique en architecture, corroborées par les résultats de mes recherches, m'ont convaincu encore davantage de la nécessité d'un changement de paradigme, tel que stipulé dans mon hypothèse de départ : la pleine exploitation de la relation concepteur-ordinateur va de pair avec un changement radical du langage pour la figuration. C'est bien dans cette direction qu'il fallait diriger ma stratégie de recherche.

Une idée commençait à prendre forme, alimentée par les réflexions entourant un débat sur Vitruve et sur l'absence de dessins dans ses *Dix livres sur l'architecture*. Selon A. Dalmas qui a traduit ces textes :

«Un mot, pour commencer, de la traduction du texte latin de Vitruve : la particularité de ce traité de l'architecture romaine est d'être unique, le seul en tout cas qui soit venu jusqu'à nous, alors que sept cents, ou presque, architectes contemporains de l'auteur travaillaient à Rome, sous Auguste. J'ai dit «venu jusqu'à nous», ce qui n'est vrai qu'en partie, puisque l'ensemble des dessins, illustrations, épures et croquis, par lesquels Vitruve avait éclairé le texte, sont perdus, et perdus depuis longtemps : perte que personne ne doit ni ne peut ignorer s'il veut mesurer avec exactitude l'intérêt et la difficulté d'une traduction quelconque—ancienne ou récente—du texte latin, que nous avons à notre disposition par diverses copies manuscrites. Il est, bien entendu, toujours possible de faire, à partir de ces copies, une traduction qu'on appellera «traduction nouvelle». Savoir passer du latin au français est la vertu nécessaire du traducteur de Vitruve, vertu insuffisante, hélas, si le traducteur n'est pas en même temps architecte, ingénieur et

géomètre, capable de ne pas gêner le vocabulaire, capable, enfin, de rétablir ces dessins, épures et croquis, aujourd'hui perdus. Il n'est pas, au surplus, interdit à notre traducteur d'être bon écrivain.» (1986, p. 3)

Et si Vitruve n'avait jamais dessiné ces épures? Sur quelle base pouvons-nous affirmer qu'il y avait des dessins? La plupart des «grandes traductions» de ces textes ont été faites à partir du XVI^e siècle dont une des mieux illustrées est celle de Claude Perrault en 1673 qui présente, en même temps que sa traduction, de superbes planches de dessins, épures et croquis. Cette époque suivait de près les enseignements de P. de l'Orme demandant à l'architecte d'être un philosophe et un mathématicien et d'acquiescer une précision dans l'épure. Il faut demander à l'architecte, disait-il, comme je l'ai déjà rapporté, d'éviter de tromper les seigneurs (Livre I, chap. X) par le dessin et de ne pas être rhétorique, comme le suggérait Vitruve, mais diligent pour permettre la bonne compréhension du bâtiment.

W.-J. Mitchell, dans *Algorithms, Machines and Architectural Performances*, nous dit que la fonction la plus intéressante et la plus puissante de la *CAD technology*, ce n'est pas d'automatiser la production des documents traditionnels pour la conception et la construction du bâtiment, mais de les éliminer. Ce souffle d'air frais dans un changement de pensée, permet de dépasser les préoccupations que C. Eastman exprimait il y a quelques années en soulignant les problèmes normatifs de l'architecture. Finalement, les outils de sortie comme les écrans, les tables traçantes, les modèles créés à l'aide d'outils de FAO proviennent du même «script», (Mitchell, 1998, p. 10) et ajoutons, du même texte et de la même logique de programmation.

Comme le souligne Mitchell, ce serait une erreur de voir l'ordinateur en architecture tout simplement comme un outil pour créer, visualiser et construire des dessins. Il faut surtout le voir représenter une nouvelle ère dans le design et la construction :

«Once buildings were constructed directly, without the intermediary of drawing. More recently, they have mostly been drawn, then constructed. This process bounded architectural exploration in arbitrary and restrictive ways: what one could not draw, one could not build.

In the future, though, the design and construction process will increasingly be one of composing digital scripts and then producing from them a wide variety of mechanized performance — graphic, material, and otherwise. Early performances — the kind we think of as visualisation and simulation — will mostly be quick and inexpensive, and will serve to reveal

the potentials inhering in a script. Later performances will be more expensive and durable, and will remain with us as built work.

By rethinking the foundation of architectural representation in this way, we will open up possibilities that we could never have imagined — let alone physically realized — in the past.» (1998, p. 10)

Finalement, si on me proposait de faire un théâtre, comment procéderais-je? Ferais-je appel aux précédents de Vitruve? Quels outils utiliserais-je? Quel langage de figuration permettrait de traiter des opérateurs géométriques en même temps que des opérateurs sémantiques? Comment ces opérateurs pourraient-ils contribuer au transfert de connaissances? Aurais-je besoin des dessins? Voilà autant de questions soulevées par les résultats de mes recherches.

Chapitre 9 Les langages de modélisation informatique

Ce chapitre fait partie du premier volet du plan d'expérimentation, il présente des langages pour la description des maquettes procédurales et, par la suite, une méthode pour cataloguer ces maquettes par un traitement qui s'apparente à celui d'un recueil encyclopédique de maquette procédurale.

Avant de répondre aux questions posée à la fin du chapitre précédent, j'ai donc voulu approfondir certains concepts informatiques qui sont souvent mal compris ou mal interprétés. Par exemple, une maquette en architecture est un objet qui peut être vu sous tous ses angles et qui représente les vues de l'objet que l'architecte a conçu. Transformer ce modèle pour qu'il soit «vu» à l'écran d'un ordinateur signifie créer une maquette numérique, ou si l'on veut une description géométrique de l'objet architectural pour qu'il soit «lu» du point de vue informatique, selon une analyse systémique de l'objet architectural.

Pourtant, nous l'avons vu dans ce qui précède, la maquette en architecture et sa représentation «sensible» ont aussi une valeur que j'appelle sémantique et les opérateurs qui définissent sa description géométrique sont ces opérateurs que l'architecte ne peut pas contrôler et «matérialiser virtuellement» et que j'ai identifiés comme une cause du blocage dans l'adoption de l'outil informatique.

C'est cette impossibilité, dans les applications informatiques actuelles, de gérer le savoir de l'architecte qui fait que ces applications ne représentent pas un pas en avant dans ce qu'on peut appeler la *CAD technology evolution* (W.-J. Mitchell, 1998), et qui fait que ces applications, estime J.-S. Gero (1999), sont inadéquates comme base pour un futur développement des outils de CAO. En effet, les recherches menées par le *Key Centre of Design Computing and Cognition* de l'Université de Sydney soulignent que les nouveaux outils de CAO devront pouvoir supporter les changements lors de la phase de conception et que cela implique un développement et des études approfondies pour une nouvelle génération de langages informatiques afin que l'outil puisse être adopté dès le début de la conception de l'objet.

9.1 Sous les images, les mots

C'est sous ce titre «Sous les images, les mots», qui rappelle le slogan «sous les pavés, les plages» de mai 68 à Paris, qu'un groupe d'architectes enseignants des Écoles d'architecture tenaient leur premier séminaire en novembre 1997, pour souligner l'importance de comprendre les textes informatiques et les méthodes de programmation pour la figuration architecturale.

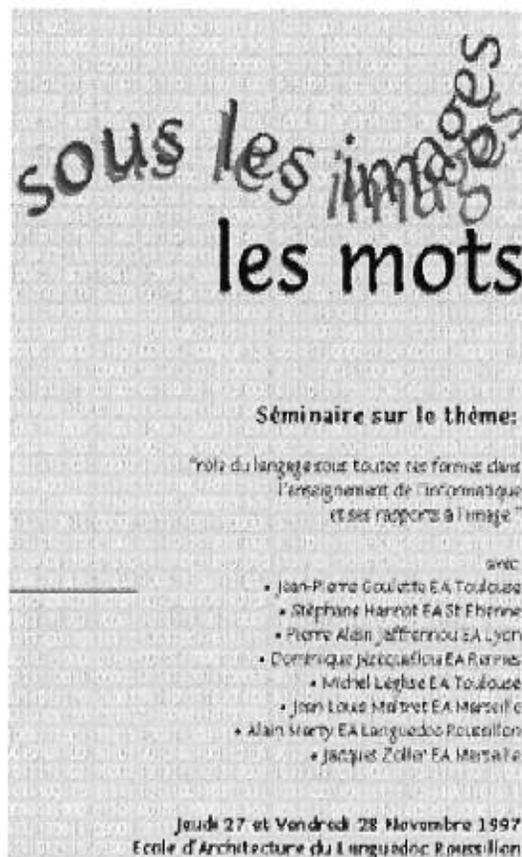


Figure 72. *Sous les images les mots* (École d'architecture du Languedoc-Roussillon, 1997)

Cette préoccupation reflète un changement de cap de la recherche. Après un développement rapide de l'informatique et des performances des machines à manipuler textes, expressions et symboles, bon nombre de chercheurs abandonnent les recherches sur l'objet machine pour réfléchir sur son utilisation dans le domaine des sciences cognitives.

Depuis quelques années, nous observons que les outils informatiques, par leur capacité de calcul, peuvent produire des effets inattendus. Il nous suffit de penser aux expériences de Mandelbrot qui produisent des formes et des scènes que nous ne pouvions pas soupçonner il y a quelques années encore aux ordinateurs qui par leur capacité à gérer une quantité considérable d'informations, peuvent mettre en relation des données extrêmement complexes pour nous permettre de découvrir des corrélations parfois surprenantes.

Cette évolution entraîne un changement de paradigme, où les langages informatiques traditionnels changent pour prendre des formes nouvelles qui modifient non seulement des méthodes et des façon de penser, mais anticipent la formation d'une fédération des sciences de la conception.

Selon J.-B. Ganascia, l'activité de l'ordinateur est d'effectuer des opérations qui sont considérées de «simples manipulations de séquences de caractères». Par exemple, une addition peut être vue comme une opération qui transforme une séquence de caractères : 45+38, dans une autre séquence de caractères : 83, sans que nous nous préoccupions de la manière dont de telles séquences et opérations sont représentées ou exécutées à l'intérieur de la machine. Ce qui signifie que ces machines ont quelque chose d'immatériel parce qu'elles ne font que transformer des séquences de signes, c'est-à-dire des textes, indépendamment du support sur lequel elles sont écrites. (1997, p. 15)

Lors des communications homme-machine, toutes les commandes sont données par l'intermédiaire d'un ensemble d'instructions, chacune d'elles étant définie par la phrase d'un texte. Les recherches des dernières années concentrent leur attention sur la rédaction de ces textes parce que c'est là, l'expérience l'a montré, qu'il y a un point critique. En effet, le fonctionnement des machines est basé généralement sur la lecture «fidèle» de ces textes.

Mais nous savons depuis une trentaine d'années que la flexibilité du langage réside souvent dans l'implicite et l'imprécis. Ce qui a fait l'objet de nombreuses études sur le langage : les études de N. Chomsky (1968) sur les types de structure de la grammaire : *deep structure, surface structure, linguistic competence* ; ou encore les recherches de R. Boudon (1968) sur la signification de structure dans les sciences humaines ; jusqu'à U. Eco qui souligne dans ses études sur la production des signes qu'«il n'y a jamais de signes en tant que tels, et beaucoup des soi-disant signes sont des

textes : et les signes et les textes sont le résultat de corrélations où entrent divers mode de production». (1992)

Il m'est donc apparu nécessaire de diriger mes expériences sur des langages informatiques qui me permettent de saisir les possibilités de «concevoir» à l'aide de l'ordinateur et de savoir si l'on peut répondre à certaines questions comme les suivantes :

- Doit-on décrire les objets ou les actions qui déterminent les objets?
- Peut-on passer du modèle conceptuel au modèle constructif (avec la description et toutes les instructions pour la construction)?
- Est-ce que le symbole que nous voyons à l'écran a beaucoup d'importance ou ce qui nous intéresse est-il plutôt l'organisation des renseignements que nous avons donnés à l'ordinateur?

P. Watzlawick (1972), dans *Une logique de la communication*, nous rappelle que la communication est une inter-action et qu'il faut s'interroger sur les blocages qu'une mauvaise interaction peut produire. Il évoque une situation de «communication paradoxale où un sujet (humain) soumis à plusieurs ordres contradictoires, émis simultanément, ne sache répondre que par la folie. C'est pour éviter le sentiment de frustration actuel dans l'adoption de l'informatique, que je me suis penché sur les langages informatiques, afin de comprendre cette réalité abstraite, d'ordre logique, mathématique et linguistique et en suivre son développement dans l'histoire.

9.2 La «conception» de l'outil informatique

Selon plusieurs chercheurs, le premier calculateur mécanique apparût en 1600. Il fut conçu par Pascal pour effectuer mécaniquement des additions et des soustractions. Son propos, selon J.-G. Ganascia, était d'opposer l'«esprit géométrique», ce qu'on appelait la raison scientifique, à l'«esprit de finesse», qui était le sentiment, l'intuition, pour montrer que ce qui fait appel à l'esprit de géométrie peut être exécuté mécaniquement par une machine, pendant que l'esprit de finesse pouvait en cueillir seulement l'essence. (1997, p. 25)

Ces expériences furent suivies peu de temps après, à la fin du XVII^e siècle, par les recherches de Leibniz, pour qui une machine pouvait avoir une certaine capacité de raisonnement, c'est-à-dire la capacité de lier plusieurs opérations pour effectuer des déductions. Selon plusieurs auteurs, Leibniz est le précurseur de la recherche sur ce que l'on appelle couramment l'intelligence artificielle (IA). Il faut rappeler que, selon Leibniz, la pensée pouvait être réduite à un calcul, tout comme la conception de l'univers n'était qu'un ensemble «réglé». C'est à lui que nous devons la formulation de la «logique symbolique», qui était à l'origine une discipline destinée à analyser la pensée en termes algébriques. Cette approche a permis à Leibniz d'imaginer une machine calculatrice qui tient compte des séquences d'opérations algébriques tout en adoptant les règles de la logique.

C'est seulement un siècle après, en 1833, que Lord Charles Babbage, en reprenant les enseignements de Pascal et Leibniz, construisit une machine calculatrice : une machine «différentielle» capable d'exécuter les quatre opérations mathématiques et certaines séquences d'opérations. Le désir de Babbage était, selon J.-G. Ganascia, d'en arriver à une automatisation des opérations et ses préoccupations étaient celles d'un pragmatique, bien différentes de celles de Pascal, davantage préoccupé par la métaphysique et l'«esprit» que par la physique et les calculs. En continuant ses expériences, Babbage conçut un autre modèle de machine «analytique» capable, comme les machines actuelles, de traiter en même temps des expressions analytiques du type $(a+b) \times (a-b)$ en convertissant une expression analytique en un procédé de calcul automatisé.

Mais c'est seulement quelques années après, en 1847, que Georges Boole, en reprenant les formulations de Leibniz, conçut un formalisme algébrique grâce auquel on pouvait représenter «les figures de la logique identifiées par les philosophes anciens et médiévaux». (Ganascia, 1992, p. 27) L'intérêt de cette formalisation réside en ce que, avant le XIX^e siècle, le raisonnement était vu comme une succession d'opérations formelles qui permettaient de passer d'un ensemble de propositions à un autre ensemble de propositions et ainsi de suite, pour identifier et classer les différentes modalités du raisonnement sous forme de figure. Les opérations les plus simples permettaient de passer de deux propositions à une troisième, selon les critères du syllogisme. Ce formalisme de Boole nous a permis de simplifier les calculs, sans mémoriser toutes les figures identifiées.

Ce survol historique permet de saisir l'importance de la «logique» dans la conception des programmes et des méthodes à utiliser. À la suite des formulations de G. Boole, on commençait à soulever un débat de fond sur les mathématiques et leur place par rapport à la logique. Un débat, qui n'est pas résolu, enfermé dans un cercle vicieux où les mathématiques se baseraient sur la logique et la logique sur les mathématiques, sans plus savoir sur quel modèle appuyer le développement entamé par G. Boole. Selon J.-G. Ganascia, plusieurs mathématiciens et philosophes (Frege, Hilbert, Russel) décidèrent de décrire l'activité mathématique en termes mathématiques en construisant une théorie formelle de la démonstration et en se basant sur le modèle déjà proposé par Euclide : en partant d'un certain nombre d'axiomes, c'est-à-dire de propositions considérées non démontrables, on déduit des théorèmes, c'est-à-dire des propositions basées sur les axiomes grâce à un ensemble de règles. Les axiomes et les règles qui permettent de déduire les théorèmes sont décrits en termes mathématiques à l'aide de la notion de systèmes symboliques.¹

Après avoir formulé la logique classique en termes algébriques et la mathématique en termes mathématiques (la «métamathématique»), l'étape suivante a été de formuler l'activité des ordinateurs en termes mathématiques. Alan Turing, en 1936, chercha à décrire l'activité des machines capables d'opérer sur des nombres entiers et sur des séquences de caractères. À la suite des travaux de Turing, on a pu démontrer que les programmes informatiques qui fonctionnent sur une machine à états discrets ou analogiques, permettant, au moins théoriquement, un nombre illimité de configurations, fonctionnent aussi, indépendamment du temps d'exécution des calculs, sur une machine très simple qui permet uniquement les quatre instructions élémentaires.

Turing décrivit la machine en termes mathématiques à l'aide des mêmes systèmes symboliques utilisés pour décrire les mathématiques. En créant le premier calculateur électronique, il fit deux constatations empiriques qui sont encore aujourd'hui importantes dans la compréhension des programmes informatiques :

¹ «Les systèmes symboliques ont été définis par les mathématiciens pour donner un sens aux expressions sans faire référence à des conventions arbitraires pour la correspondance entre signes et signification. À ce propos les systèmes symboliques partent des axiomes pour construire les théorèmes à l'aide des règles de dérivation ; et les axiomes et les règles de dérivation sont exprimés dans un langage formel exactement défini, consentant la programmation informatique des systèmes symboliques. Cependant leur implémentation fait face à une série d'obstacles qui a conduit les experts en IA à introduire le concept d'heuristique». (J.-G., Ganascia, *L'intelligenza artificiale*, 1997, p. 28 ; traduction de G. De Paoli, 1999)

- le résultat d'une commande ne s'apparente pas à ce que nous lui avons fourni comme donnée, en ce sens que le nombre d'opérations est tel que nous ne pouvons pas reconstruire le chemin ;
- la difficulté de déterminer l'origine du comportement de la machine crée une difficulté aux programmeurs qui n'arrivent pas à retrouver la cause d'un erreur de programmation.

Pour surmonter ces obstacles, certains chercheurs proposent de se pencher sur la possibilité d'utiliser une stratégie de compréhension en observant la machine par ses effets extérieurs plutôt que par ses réactions mathématiques et en introduisant le concept d'heuristique qui permet d'orienter les programmes vers une approche qu'on appelle aujourd'hui causal-probabiliste et qui permet au programme d'orienter la recherche d'une solution plutôt que de chercher passivement dans ses routines.

En partant de ces considérations, John McCarthy proposa en 1956 de créer une nouvelle discipline qui prit le nom d'intelligence artificielle (IA) dont les buts étaient de reproduire des comportements intelligents à l'aide d'un ordinateur. À la même époque, Herbert Simon et Alan Newel construisirent une machine, appelée *Logic Theorist*, basée sur l'utilisation de systèmes symboliques et sur l'introduction de l'heuristique dans les systèmes symboliques. Mais, selon J.-G. Ganascia, l'évolution de l'IA n'a pas eu l'essor voulu. Pendant qu'en 1957, Newel et Simon espéraient réformer la psychologie cognitive par une modélisation informatique des théories psychologiques, d'autres chercheurs, comme Marvin Minsky et Roger Schank, se basaient sur les théories classiques de la psychologie, fondées sur l'étude de la mémoire, pour concevoir des nouvelles méthodes d'organisation de la connaissance par l'informatique. Et, plutôt que de chercher une simulation de l'intelligence, on limitait la portée des programmes à des domaines spécifiques, donnant lieu, autour des années soixante-dix, à la notion de système expert et à l'évolution de plusieurs programmes basés sur le traitement des données et le stockage des connaissances.

Nous sommes, aujourd'hui, en face d'un nouveau paradigme, une quatrième période selon les scientifiques, où l'on tente de comprendre le phénomène en cherchant à unifier différentes approches, en introduisant de nouveaux concepts comme celui des réseaux neuraux. Ce concept est basé sur une analyse de données interreliées d'une façon complexe inspirée de l'approche connexionniste de la cybernétique, approche qui

rappelle le système nerveux et ses interconnexions et dont Francisco J. Varela (1996) fait une analyse exhaustive, dans *Invitation aux sciences cognitives*.

9.3 Un modèle pour la définition des opérateurs

Les recherches sur la définition des opérateurs qui gouvernent l'espace de la conception depuis le tout début de la conception m'ont amené à développer un premier modèle en conception assistée par ordinateur qui comprend une méthode de conception par les actions et la définition des opérateurs. Ce modèle original a été présenté pour être mis à l'épreuve lors des sessions de travail à la 5^e Table ronde sur les objets en conception organisée en 1997 par l'INRIA (Institut national de Recherche en Informatique et en Automatique) de Sophia-Antipolis en France.

L'objectif derrière la création du modèle était de comprendre et d'expliquer les liens entre la communication visuelle et l'informatique. Il s'agissait d'expliquer les problèmes à résoudre pour établir un langage commun et explorer des voies de solution, dans le cadre de mon hypothèse de travail selon laquelle la pleine exploitation de la relation concepteur-ordinateur va de pair avec un changement radical du langage pour la figuration. L'enjeu scientifique de cette démarche étant que l'utilisation de l'informatique comme outil de description des actions des intervenants du projet permet une nouvelle forme de traitement de l'information en architecture, c'est-à-dire une nouvelle façon de codifier l'information pour la transmettre aux destinataires.

Cette façon de faire aide à résoudre les problèmes de compréhension de l'information et permet une meilleure exploitation de la créativité des acteurs lors du processus de design, sans inhiber la pensée architecturale. Mon objectif était de comprendre et de décrire les langages pour la figuration et les méthodes de travail qui en découlent, ce qui signifie comprendre le traitement des actions des participants au projet et observer les liens entre les figurations.

Cette démarche accompagnée des recherches sur les méthodes de travail des architectes ont mené à l'identification d'une série d'opérateurs des actions et à proposer l'utilisation d'un langage de figuration unique pour tous les acteurs ; ce qui signifie proposer et vérifier une approche différente pour la figuration architecturale et

contribuer à clarifier la problématique des langages pour la figuration et l'utilisation de l'informatique en architecture.

Le modèle tient compte de la question de départ : comment l'architecte peut-il tirer parti de la CAO considérant qu'il a développé un langage et des méthodes de travail adaptés à la représentation bidimensionnelle? Il définit comment opère le processus de conception architecturale tout en tenant compte du débat scientifique sur l'utilisation de l'informatique en architecture. L'objectif étant de proposer une voie de solution aux blocages chez les architectes dans l'utilisation de la CAO. Ces considérations amènent aussi à tenir compte, lors de l'explication des problèmes à résoudre pour construire un langage de figuration commun, de l'approche pour la conception que les architectes ont parfois développée et qui est souvent conçue en terme de résolution de problèmes.

Finalement, l'informatique nous permet de centrer nos réflexions sur les liens entre les langages de figuration et les actions des participants associés au processus de conception du projet et sur les problèmes de communication de l'information, c'est-à-dire sur le langage à adopter pour notre figuration. Et ma stratégie de recherche consiste à trouver et valider expérimentalement, par des essais de conception architecturale, le modèle d'un langage de figuration commun aux acteurs. Ce modèle comprend des opérateurs qui décrivent les actions de modélisation architecturale dans l'environnement syntaxique d'un langage de programmation.

L'intérêt de cette démarche qui propose un changement des méthodes de communication visuelle, réside dans la nécessité de trouver de nouvelles procédures pour résoudre les blocages chez les designers et les architectes dans l'utilisation de la CAO, blocages qui causent l'incohérence et la fragmentation de l'information nécessaire à la figuration.

Pour permettre l'avancement d'une réflexion dans cette direction, j'ai étudié et modélisé le processus de figuration par la définition d'opérateurs qui gèrent certaines actions de conception. Ce processus permet de définir non seulement les résultats d'une communication visuelle, mais aussi les actions, ce qui signifie une meilleure exploitation de la technologie de CAO et une interactivité entre les acteurs.

Pour construire ce modèle, j'ai fait appel, comme je l'ai déjà souligné, aux recherches sur la conception des programmes de CAO et sur les méthodes de travail des architectes. Les recherches sur les programmes de CAO nous permettent d'analyser les rôles et les actions de l'architecte et des acteurs, dans le contexte de la CAO, et d'identifier les blocages actuels pour justifier l'intérêt d'utiliser la technologie informatique. Ces recherches ont établi des liens entre les techniques de programmation des logiciels et les causes qui limitent leur utilisation et ont montré que pour optimiser le travail de l'architecte, nous devons résoudre un certain nombre de problèmes tant du côté des techniques informatiques que du côté des méthodes de pratique de l'architecte. (Akin, 1984 ; Quintrand, 1985 ; Mitchell, 1989 ; Eastman, 1991 ; Flemming, 1994 ; Tidafi, 1996)

Les études sur les méthodes de travail nous permettent d'affirmer que les outils de travail de l'architecte sont outils de communication et de simulation du projet avec les spécialistes et les non spécialistes. Traditionnellement, l'«outil» dessin a été utilisé pour reproduire l'achèvement d'un processus de conception plutôt que de servir comme outil de prise de décision pendant tout le processus. Ces outils doivent alors permettre une expérimentation, une observation, une mesurabilité du modèle et offrir la possibilité d'en modifier le résultat avant sa réalisation. (Lebahar, 1983 ; Conan, 1990 ; Prost, 1992 ; Boudon, 1994)

Ma proposition veut que les actions posées pour développer un langage de figuration répondent à un certain type d'organisation de l'information et que les moyens informatiques mis actuellement à la disposition des concepteurs ne sont utilisés que pour améliorer le rendement par rapport à l'ancienne table à dessin, sans pour autant qu'ils remettent en question les méthodes de représentation symbolique du projet en architecture.

Pour répondre aux interrogations scientifiques sur l'adoption de l'ordinateur pour rendre le processus de design plus explicite et plus transparent, je me suis centré sur l'explication des problèmes à résoudre pour construire un langage de figuration, en tenant compte du fait que les architectes abordent souvent la conception sous l'angle de la résolution de problèmes.

Pour établir la validité d'un modèle, il faut l'accompagner d'un test qui doit convaincre de la cohérence du modèle proposé. C'est ce que je propose : décrire un modèle théorique et le mettre à l'épreuve. (Figure 73)

Devis descriptif pour la figuration	Établissement d'une grammaire topique des actions (opérateurs) Par exemple : «enlever», «ajouter»	Intervention sur le substrat
Définition des besoins, selon les acteurs/opérateurs.		↓ Figuration des opérations

Figure 73. Le modèle pour la définition des opérateurs

Le modèle est mis à l'épreuve par des tests sur un prototype et à l'aide d'outils qui permettent la modélisation : un langage de programmation, le langage fonctionnel *Scheme* (un dialecte du langage *Lisp*) et un logiciel de visualisation des fonctions. Ces outils donnent d'une part, la description des opérateurs qui gouvernent les actions et d'autre part, si nécessaire, l'image volumique de l'objet.

Le modèle présenté se base sur le fait qu'il faut avant tout organiser l'information pour la figuration en créant une liste des besoins, c'est-à-dire un devis descriptif. Par la suite, les actions des acteurs/opérateurs, traduites en langage de programmation seront «vues» en utilisant le logiciel de représentation volumique. Ces manipulations doivent nous permettre de reproduire et vérifier les conditions qui influencent les actions et les opérateurs. (Figure 74)

Étape 1	Étape 2	Étape 3	Étape 4	Étape 5
Organisation de l'information (devis descriptif)	Identification des actions	Définition des opérateurs correspondants	Communication visuelle	Validation des liens entre actions et opérateurs

Figure 74. Vérification des conditions qui influencent les actions et les opérateurs

La stratégie de preuve pour valider ces expériences est d'établir, tout en tenant compte de la complexité des biais possibles comme le biais de sélection des actions, une

corrélation entre les actions et les opérateurs sur le substrat et d'expliquer les problèmes à résoudre pour transformer la représentation de la forme.

Mon but est de généraliser ces expériences, c'est-à-dire permettre d'établir des règles «technologiques» pour élaborer un langage commun en communication visuelle. C'est en agissant sur le substrat, en modifiant la description de certaines actions et en appliquant des transformations que nous allons définir des actions selon les acteurs du processus de conception et que nous allons observer les formulations des problèmes par la figuration. (Figure 75)

Étape 1	Étape 2	Étape 3	Étape 4	Étape 5
Compréhension des actions selon les acteurs	Modification des actions par les opérateurs	Figuration et observation des résultats visuels	Validation des opérateurs qui agissent sur le substrat	Établissement des règles technologiques

Figure 75. Formulation des problèmes par la figuration

Par l'interprétation des résultats visuels, je veux trouver les outils pour valider les opérateurs qui nous permettent, grâce à un langage informatique, d'agir sur le substrat. Ces opérateurs nous donnent les outils pour établir des règles technologiques pour la figuration.

Ce modèle et sa manipulation ont permis de faire une première vérification de mon hypothèse de recherche, qui consiste à dire que la pleine exploitation de la relation concepteur-ordinateur va de pair avec un changement radical du langage de communication pour la figuration, et ont aussi permis de répondre à la question de recherche par la mise en place d'un modèle pour la modélisation qui comprend des opérateurs agissant sur un seul prototype architectural.

En agissant sur un prototype unique tout au long du processus, la figuration des actions peut être définie par des opérateurs qui permettent des interactions et une description du projet d'architecture dès le début de la conception. Cette description n'est pas pour autant plus simple, l'action suppose la complexité et, comme le dit E. Morin, «L'action est stratégique. [...] La stratégie permet, à partir d'une décision initiale,

d'envisager un certain nombre de scénarios pour l'action, scénarios qui pourront être modifiés selon les informations qui vont arriver en cours d'action et selon les aléas qui vont survenir et perturber l'action».(1996, p. 106)

La contribution de cette d'étude à l'avancement d'une réflexion sur les langages de communication visuelle est d'ouvrir une nouvelle approche de la conception architecturale, par la définition des opérateurs des actions des acteurs. Par cette démarche, nous allons comprendre le phénomène qui induit les barrières actuelles entre les acteurs du processus de conception et entre l'architecte et l'outil informatique, et nous pourrons proposer une nouvelle voie de solution vers une meilleure utilisation des outils pour la conception assistée par ordinateur.

9.4 Pour une encyclopédie discursive de maquettes procédurales

Les résultats de la mise à l'épreuve du modèle que j'ai présenté sur des travaux réalisés par le GRCAO¹ pour figurer des modèles volumiques, m'ont amené à étudier les actions engagées dans la modélisation volumique et à proposer une nouvelle méthode de lecture de cette information. Cette proposition étudie les actions en termes de connaissances sous forme d'encyclopédie sémantique et non seulement par l'établissement d'une grammaire topique des actions, comme proposé au départ dans le modèle ci-haut présenté.

En effet, comme le soulignent F. Adreit et P. Vidal, la conception peut être définie comme un processus téléologique évolutif et complexe de construction de modèles sur lesquels les concepteurs raisonnent, exercent leur intelligence et élaborent leur activité de conception. (1998, p. 73) Dans cette perspective les auteurs soulignent que :

«Les concepteurs d'un SI (système d'information) construisent une représentation d'un phénomène étudié sous la forme d'un exemple d'un modèle conceptuel des données (MCD). Celui-ci constitue une compréhension, une conception des données manipulées. Il leur permet de raisonner sur le phénomène étudié, de comprendre ses dysfonctionnements, de faire émerger des projets, et de concevoir un nouveau MCD. B. Morand (1994) étudie le processus de conception d'un système d'information dans

¹ Groupe de recherche en conception assistée par ordinateur, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal.

cette perspective : les modèles sont considérés comme des états qui rétroagissent sur le processus de conception.» (1998, pp. 73-74)

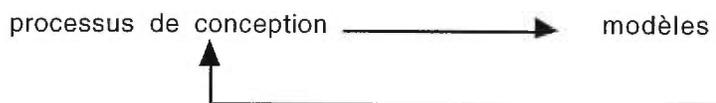


Figure 76. Les modèles à la fois résultats et moyens dans le processus de conception des systèmes d'information (F. Adreit et Vidal, 1998)

Cette proposition d'encyclopédie discursive de l'objet prend son origine dans les théories de la coopération interprétative de U. Eco (1984) et dans le modèle qu'il propose. A. Semprini, dans son livre *L'objet comme procès et comme action*, présente une analyse exhaustive de ces théories. L'auteur dégage l'importance de l'analyse discursive de l'objet en soulignant que «la pratique dont l'objet est issu est une pratique incarnée, indexicale, réflexive, collective et socialement définie». Et, ajoute-t-il, c'est «seulement en inscrivant la problématique de l'objet comme pratique à l'intérieur de la plus vaste problématique de l'objet comme intersubjectivité que l'on peut arriver à cerner dans quel sens l'objet est une véritable pratique ou, pour utiliser un terme encore plus explicite, l'objet est une action». (1995, p. 121)

C'est justement l'action qui permet de voir les objets architecturaux, non plus comme des images, mais l'architecture comme un discours, en dépassant la perception dimensionnelle, pour l'encapsuler dans un langage que les ordinateurs pourront traiter et les acteurs du processus de conception comprendre. A. Semprini souligne :

«Ainsi, l'explicitation du caractère indexical et réflexif des objets, nous permet de disposer d'un argument théorique important pour justifier, dans un contexte d'interaction déterminé, la capacité qu'ont les objets de fonctionner non seulement comme objets, c'est-à-dire comme choses plus ou moins lisibles et interprétables, mais comme véritables opérateurs de manipulation de l'interaction et du déclenchement de la réflexivité.» (1995, p. 129)

Ce sont ces opérateurs de manipulation de l'interaction qui doivent primer lors d'une description de type encyclopédique d'objets que l'architecte manipule par ce déclenchement de la réflexivité, ce que D. Schön (1982) appelle des objets-type, c'est-à-

dire des objets qui font réfléchir ou avec lesquels on réfléchit. I. Iordanova (1999), dans une présentation sur la *Modélisation par actions d'objets-type en architecture*, nous rappelle que la conception d'un bâtiment se fait sur la base de choses déjà vues ou vécues et que la liaison entre «ces choses», que Semprini a appelées les opérateurs de manipulation de l'interaction, est l'espace de conception dans lequel agit l'architecte. Cet espace est celui que je propose de remplir par des maquettes procédurales.

Cette définition des maquettes est nouvelle et originale parce qu'elle n'exprime pas un résultat analogique, comme par exemple, une image tridimensionnelle d'un mur. Elle exprime le discours qui permet à l'occasion de la «visualiser» par des liens dialectiques entretenus entre les différents éléments qui la composent ; et cela, non seulement du point de vue structural, mais surtout sémantique. Comme le souligne C. Deshayes, «Cette étape du projet d'architecture où émerge l'objet de conception est ce moment où l'architecte s'est suffisamment imprégné, a intériorisé et intégré son projet au point où les contraintes deviennent ses propres intentions. Ainsi, le projet d'architecture n'est pas une simple résolution de problèmes, mais bien une manière de choisir et de poser le problème». (1998, p. 52)

Ce qui signifie que ces descriptions dans une encyclopédie ne peuvent pas se satisfaire de l'approche formelle telle que proposée par exemple par G. Stiny en 1980 et qui consistait dans l'initialisation de symboles et formes et puis dans leur transformation en opérateurs géométriques syntaxiques qui génèrent des objets du même «style». À ce propos, I. Iordanova (1999) souligne que le même Stiny identifiait en 1990 une des problématiques de ces approches automatisées par les «formes émergentes», qui sont des configurations non explicites, mais qui peuvent par la suite être élaborées et devenir explicites lors de la figuration.

Dans son étude sur l'objet, A. Semprini souligne l'importance de sémiotiser l'objet, dans le sens de «l'appréhender “sous une description”» et d'en voir le rôle syntaxique et sémantique à la fois «dans la mesure où il contribue, sous des descriptions différentes, à la structuration de la fonction sémiotique. Tout en étant lui-même une émergence, l'objet peut fonctionner, par exemple, comme opérateur de localisation ou de spatialisation, et contribuer ainsi à l'émergence d'une signification dont il n'est qu'un élément», ce qui signifie que nous devons voir l'objet sous un double mode de fonctionnement, comme texte et comme discours. (1995, pp. 159-160)

Ceci nous ramène aux théories de U. Eco qui souligne la dimension discursive de la signification à laquelle s'oppose la notion de connaissance en forme de dictionnaire qui est plus liée à une dimension linguistico-textuelle, en proposant que l'on conceptualise la langue non pas comme un dictionnaire fini mais comme un système complexe de compétences encyclopédiques. C'est ce que j'ai déjà montré avec le langage fonctionnel utilisé pour les projets du GRCAO et que j'appelle les savoir-faire.

Finalement, comme le décrit Eco :

«L'encyclopédie est un postulat sémiotique. [...] Elle est l'ensemble enregistré de toutes les interprétations, concevable objectivement comme la librairie des librairies...[...]L'encyclopédie est une hypothèse régulatrice selon laquelle, à l'occasion de l'interprétation d'un texte (qu'il s'agisse à l'angle de la rue ou de la Bible), le destinataire décide de construire une portion d'encyclopédie concrète, qui lui permette d'assigner au texte ou à l'émetteur une série de compétences sémantiques. [...] Le modèle de l'encyclopédie sémiotique n'est pas l'arbre, mais le rhizome : chaque point du rhizome peut être connecté et doit l'être avec tout autre point. En effet, dans le rhizome il n'y a pas des points ou des positions, mais seulement des points de connexion. (Eco, 1984, p. 109-112)

Grâce à cette vision, comme le souligne A. Semprini, l'acteur va puiser les informations qui lui sont nécessaires dans son encyclopédie pour décoder et interpréter, ce que justement l'ordinateur peut faire :

«L'activation de l'encyclopédie fonctionne comme l'allumage d'un ordinateur, dont on consulte la mémoire pour y trouver les règles contextuelles d'utilisation de la langue. L'allusion à la forme rhizomatique (Deleuze et Guattari, 1976) est d'ailleurs significative. Elle anticipe, dans le langage et la sensibilité de son époque, les plus récentes théories sur le fonctionnement hypertextuel de l'ordinateur (Lévy, 1990) inscrites à leur tour dans le paradigme connexioniste. C'est précisément par ce biais qu'il me semble possible d'entrevoir une récupération discursive, intersubjective, réflexive et constitutive du concept d'encyclopédie». (1995, p. 191-192)

Il s'agit de donner, avec les travaux de modélisation, une visibilité «cognitive» de l'objet pour permettre, par exemple, une reconnaissance, une compréhension, une mémorisation et une visibilité «fonctionnelle», pour permettre aussi de comprendre son utilisation, son fonctionnement et enfin, une visibilité «phénoménologique» qui décrit, entre autre, la forme, la couleur, le matériau. Sous cette forme, la maquette procédurale «constitue le stock de connaissances partagées que les acteurs mobilisent sans le problématiser, par le fait même d'instaurer une conversation», (Semprini, 1995, p. 212)

et avec ces connaissances la maquette acquiert une «visibilité» qui lui permet d'être disponible pour d'autres opérateurs et d'autres maquettes et pour rendre ces dernières «visibles», à leur tour enrichies des visibilités cognitives, fonctionnelles et phénoménologiques des autres maquettes.

Cette approche devrait assurer à cette encyclopédie de donner une visibilité des objets, par la reconnaissance élémentaire, plutôt que par une reconnaissance mécanique (Merleau-Ponty, 1945) et en même temps opérationnelle qui permet la «croissance» et l'enrichissement des maquettes procédurales par des «fonctions» nouvelles. Il s'agit donc de décrire les «fonctions» qui gouvernent les maquettes et de définir les liens dialectiques entre ces fonctions, pour permettre au besoin la visualisation de l'objet conçu. Cette encyclopédie sera donc un texte, et en même temps un discours, et des logiciels tels SGDL¹ pourraient être les lecteurs et les interprètes de ces textes, pour visualiser à l'occasion ces langages du «non visible».

9.4.1 Quelques exemples de maquettes procédurales

La présentation qui suit est un exemple de recueil encyclopédique de maquette procédurales. Ce recueil veut présenter une méthode pour cataloguer ces travaux en ajoutant le «discours» du concepteur à la description qui encodée et traduite par l'ordinateur servira non seulement d'exemple analogique, lors de la représentation de l'image, mais aussi d'exemple «sémantique», lors du traitement par d'un langage fonctionnel. Elle veut aussi inciter à prendre des travaux de modélisation, réalisés avec d'autres méthodes pour les ré-écrire sous cette forme.

Le choix des maquettes présentés est caractérisé par la différence des approches de chacun des auteurs et, en même temps, par les liens dialectiques entre les fonctions qui définissent ces maquettes procédurales. Cette présentation se distingue aussi parce qu'elle se soustrait à l'analyse par une grille de valeurs, ou à l'adoption d'un gabarit de

¹ «La signification de l'acronyme SGDL est multiple. Pour les spécialistes de la modélisation volumique habitués au système CSG (*Constructive Solid Geometry*) SGDL signifie principalement *Solid Geometry Design Logic*. Il sera montré que SGDL englobe CSG comme cas particulier. Pour les nostalgiques du temps passé, SGDL sont les initiales et la signature du géomètre, architecte et ingénieur Sieur Girard Desargues Lyonnais, soit S.G.D.L.. D'autres enfin, spécialisés dans les langages pourront décliner avec raison SGDL comme *Solid Geometry Design Language*. Enfin rendre hommage à K. Gödel ne sera que justice car le système SGDL n'est-il pas en effet un Système GÖDeLien... (Rotgé, 1997, p. 6)

présentation commun : dans la logique de l'approche de type encyclopédique, elle se présente sous forme de discours. Ces exemples ont une valeur heuristique dans le cadre d'un processus téléologique, évolutif et complexe de construction de modèles. (Figure 77)

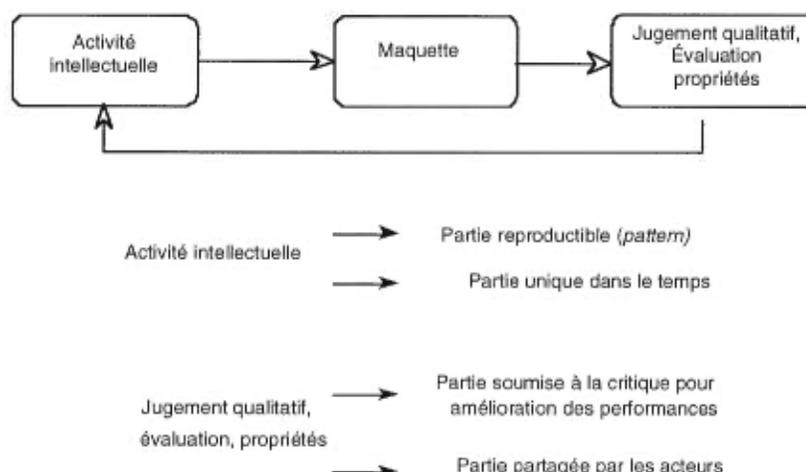


Figure 77. Processus de construction de modèles

Les cas traités ont en commun une méthode pour traduire l'information complètement explicite et qui est partagée par tous les acteurs du processus. Cette traduction se fait par le biais d'une supra-fonction qui appliquera cette méthode, selon les circonstances, pour produire une famille d'objets de la même nature ou ce que l'on peut appeler un objet «générique», ou encore un «archétype».

On remarquera que les discours présentés permettent une variation de formes qui dépasse les variations simplement dimensionnelles ou métriques pour accepter toutes les variantes possibles d'une même logique d'action ou de «savoir faire». On remarquera aussi la «griffe» ou le style de l'auteur, parce que pour que cette proposition d'encyclopédie soit l'expression de savoir-faire, elle doit aussi être subjective dans le discours sémantique, tout en décrivant les fonctions dans «la même langue». Ce qui signifie que le nombre de fonctions ou subdivisions pour arriver à un résultat pourrait différer selon l'auteur. Cette personnalisation est celle qui permet à l'architecte d'agir en pleine liberté tout en réduisant les blocages. Enfin, ce processus peut être adopté ou rejeté selon le concepteur qui en prend connaissance, sa fonction étant principalement didactique.

Ce type de présentation des maquettes procédurales découle de discussions et d'études faites au GRCAO pour inciter une utilisation des travaux de modélisation des chercheurs. Les travaux présentés, qui m'avaient été remis par les auteurs comme exemples de maquettes procédurales sont l'œuvre de C. Parisel et M. Bogdan, mon intervention consiste à consigner ces discours sémantiques et informatiques selon l'approche encyclopédique que je viens de décrire. Le but de leur présentation étant d'aider les «lecteurs» à comprendre la stratégie adoptée pour valider les opérateurs sémantiques que j'illustrerai lors de mes expériences.

Le dôme géodésique développé par Buckminster Fuller se prête bien à un premier discours sur les maquettes procédurales et son insertion dans un projet plus vaste d'encyclopédie est une parfaite illustration d'un processus relativement simple qui produit un résultat extrêmement complexe. La description du processus de genèse de cet objet est faite par la description du processus de conception d'un dôme géodésique comme une séquence logique d'actions et de décisions avec le dialecte *Scheme*.

9.4.1.1 *Le cas du dôme de Buckminster Fuller (Parisel, 1997)*

Selon l'auteur de ce discours fonctionnel, C. Parisel, un dôme géodésique résulte d'une succession de subdivisions particulières d'un polyèdre régulier le plus souvent formé de triangles. Celui-ci est projeté généralement sur une sphère ou quelquefois sur une ellipsoïde ou éventuellement sur une surface non fermée comme une parabolöide ou même un cône.

Les variantes proviennent du type de polyèdre de départ, de la nature de la subdivision et de la fréquence adoptée, c'est-à-dire du nombre de subdivisions successives que l'on effectue, et enfin de la surface et de la méthode de projection retenue. Le monde des polyèdres est un univers en soi tellement riche qu'il n'est même pas question de le survoler ici.

Nous limiterons les polyèdres de départ possibles à ceux qui sont les plus fréquemment utilisés :

- le tétraèdre, qui est un polyèdre formé de 4 triangles équilatéraux, 4 sommets et 6 arêtes ;
- l'octaèdre, polyèdre formé de 8 triangles équilatéraux, 6 sommets et 12 arêtes ;
- l'icosaèdre, polyèdre formé de 20 triangles équilatéraux, 12 sommets et 30 arêtes.

Le plus utilisé est l'icosaèdre qui est à la base du concept du pavillon des États-Unis de l'exposition universelle de 1967, à Montréal.

Cependant d'autres polyèdres peuvent aussi être utilisés parmi lesquels on peut citer :

- le cube, que l'on connaît si bien ;
- le dodécaèdre, polyèdre formé de 12 pentagones, qui est le dual de l'icosaèdre, c'est-à-dire celui que l'on obtient en plaçant un sommet au milieu de chaque face de l'icosaèdre ;
- le cuboctaèdre, polyèdre formé de 6 carrés et 8 hexagones, que l'on obtient en tronquant un octaèdre par un cube ;
- le rhombicuboctaèdre, polyèdre formé de 18 carrés et 8 triangles, qui peut s'obtenir en tronquant les arêtes et les sommets d'un cube et ainsi de suite.

En fait, tous les polyèdres réguliers inscrits dans une sphère peuvent être utilisés comme point de départ. Il faut cependant «réduire» au préalable les faces qui ne sont pas triangulées, comme les carrés, les pentagones ou les hexagones, à un ensemble de triangles réguliers ou pas. Dans tous les cas, on s'assure qu'un sommet du polyèdre et non une face ou un segment soit situé à la verticale du centre de la sphère circonscrite au polyèdre, de façon à assurer un écoulement facile de l'eau. (Figure 78)

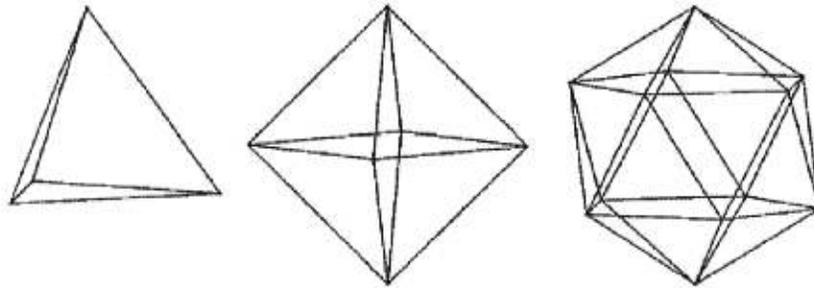


Figure 78. Les polyèdres courants : le tétraèdre, l'octaèdre et l'icosaèdre

- Les types de subdivision

Les subdivisions possibles sont très diverses et peuvent être classées de plusieurs façons selon le domaine de connaissance dans lequel on œuvre. Pour des fins de «production» nous les classerons selon quatre types :

- 1) la subdivision simple, qui consiste à subdiviser les arêtes d'un triangle pour obtenir des sommets supplémentaires et à partir de ces nouveaux sommets, reformer de nouveaux triangles en partant de deux triangles de l'icosaèdre (SUB_NULL) ; une subdivision en 2 permettra de former 4 triangles pour chaque triangle initial subdivisé (SUB_2) ; une subdivision en 3 permettra de remplacer chaque triangle initial par 9 nouveaux triangles (SUB_3) ; une subdivision en 4 revient à faire deux fois une subdivision en 2, c'est-à-dire remplacer chaque triangle par 4 triangles qui, à leur tour, seront remplacés par 4 autres pour obtenir un total de 16 triangles (SUB_2-2). Toutes les subdivisions simples sont toujours des multiples de 2 et de 3 et peuvent être obtenues par une succession des subdivisions en 2 et en 3 (2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, 16, 18, ...). Le pavillon des États Unis est une subdivision 16 de l'icosaèdre. (fig.4) ;
- 2) la subdivision étoilée, qui consiste à trouver le point de rencontre des médianes d'un triangle et de reformer, à partir de ce nouveau sommet et de ceux existants, 3 nouveaux triangles. Cette subdivision est souvent utilisée comme dernière subdivision pour donner de la rigidité à l'ensemble (SUB_4) ;
- 3) la subdivision croisée, qui consiste à trouver le point de rencontre des médianes de 2 triangles adjacents et de reformer 2 nouveaux triangles, à partir de ces deux nouveaux sommets et des deux extrémités du segment commun.

On pourrait tout aussi bien utiliser la rencontre des médiatrices au lieu des médianes comme nouveau sommet (SUB_1) ;

- 4) la subdivision étoilée et croisée, qui consiste à effectuer sur deux triangles adjacents une subdivision étoilée et de relier les deux nouveaux sommets entre eux et avec ceux de l'arête commune. Ainsi 2 triangles adjacents sont remplacés par un tétraèdre. Ce type de subdivision est utilisé comme dernière subdivision et permet d'obtenir un dôme à deux nappes c'est-à-dire dont l'enveloppe a une épaisseur, une des nappes étant de type triangulaire et l'autre de type hexagonale. C'est le cas du pavillon des États-Unis dont la nappe extérieure est triangulaire et la nappe intérieure hexagonale (SUB_5). (Figure 79)

On remarquera que les deux premiers types de subdivision ne nécessitent la «connaissance» que d'un seul triangle alors que, dans les deux suivants, il faut connaître deux triangles adjacents pour pouvoir effectuer la subdivision. Il y a donc une différence nette dans l'information requise. Dans le premier cas, une liste simple de triangles sera suffisante, alors que, dans le deuxième cas, il faudra un contrôle de nature topologique puisqu'il nécessite en entrée du processus une paire de triangles qui partagent la même arête.

- La nature de la projection

La projection est caractérisée par un centre de projection où convergent toutes les «projetantes» et une surface sur laquelle on projette. Dans la grande majorité des cas, la projection se fait sur une sphère mais il est possible d'effectuer la projection sur une ellipsoïde pour se conformer à des contraintes formelles que la sphère ne peut pas toujours satisfaire. On remarque que les deux volumes font partie de la famille des «quadriques» et que la sphère n'est qu'un cas particulier de l'ellipsoïde. Une définition de la surface par la dimension du demi axe en X, Y et Z permettra de spécifier toutes les ellipsoïdes et, lorsque les trois ont la même valeur, le rayon d'une sphère. Cependant, par voie de conséquence, cette définition permet de spécifier toutes les «quadriques» comme le cône elliptique, la parabololoïde ou l'hyperboloïde.

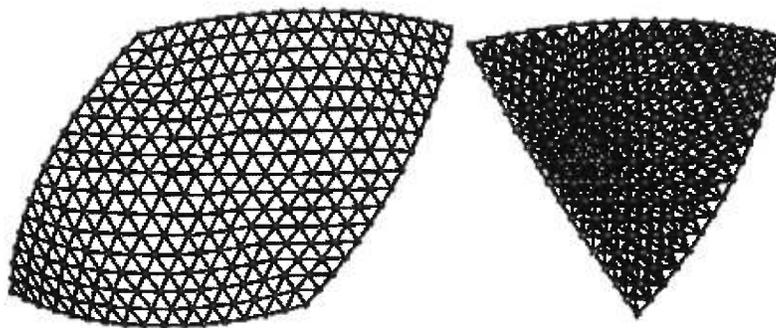


Figure 79. Subdivisions du pavillon des États-Unis à l'Expo67. Subdivision en 16 (2-2-2-2) et construction d'une double nappe hexagonale sur une sphère de rayon plus petit

Si la projection se fait sur une sphère, elle doit être coupée quelque part pour obtenir un dôme. Si on ne veut pas couper des membrures mais compléter tous les triangles, le plan de coupe horizontal ne peut pas être choisi n'importe où. Un icosaèdre, par exemple, possède deux plans horizontaux qui laissent les triangles entiers. La suppression de la calotte du bas produira une enveloppe plus grande que la demi-sphère comme celle du pavillon des États-Unis. Par contre, à la première subdivision en deux, on dispose d'un nouveau plan horizontal qui passe par le centre de la sphère et permet d'obtenir une enveloppe en demi-sphère.

Le centre de projection est en général situé au centre de la sphère circonscrite au polyèdre de départ. Ceci a pour effet que toute droite qui n'appartient pas à «l'équateur» de la sphère sera projeté sur celle-ci selon un cercle qui n'est pas horizontal, c'est-à-dire, qui introduira des différences de hauteur. Ceci peut être contraignant pour asseoir un dôme sur une surface horizontale. Pour être assuré d'avoir une base horizontale, il est nécessaire que les arêtes de la base qui vont être projetées le soient dans le même plan que le centre de projection. Pour cela, il peut être nécessaire que le centre de projection ne soit pas au centre de la sphère circonscrite au polyèdre. Certains choisissent de déplacer verticalement le centre de projection au même niveau que les arêtes dont ils veulent faire la base du dôme. Dans le pavillon des États-Unis de l'Expo67, Buckminster Fuller a choisi, pour fermer la partie inférieure du dôme, de projeter les sommets dans le plan horizontal qui les contient. (Figure 80)

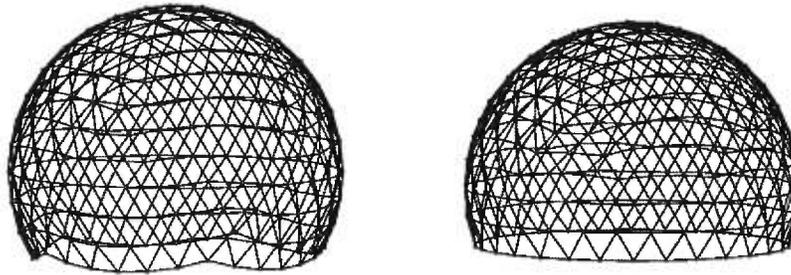


Figure 80. Effet de la hauteur du centre de projection sur l'horizontalité de la base

Cependant cette pratique d'une projection variable selon les conditions ne correspond pas à la pratique courante. Il faut aussi remarquer que la projection n'est pas toujours exécutée et que la subdivision peut se faire directement dans le plan du triangle.

- Stratégie informatique

Devant la diversité des options, que ce soit de polyèdre de départ, de centre et de surface de projection, comme de type de projection, il est difficile de trouver un principe mathématique ou géométrique unique qui permette de construire tous les cas observés. Au lieu de restreindre les possibilités pour optimiser le processus, nous avons opté pour une approche plus large encore qui permettra de produire toutes les variantes décrites et plus.

En effet, la solution qui apparaît la plus générale consiste à bâtir des fonctions de subdivisions de triangles qui sont indépendantes de la sphère et donc non géodésiques, et qui permettent d'effectuer un «maillage» triangulaire de n'importe quelle quadrique selon n'importe quelles règles. Dans ce cadre, le point de départ est une liste de triangles et le retour une autre liste de triangles obtenus à partir de la première liste par une fonction quelconque de transformation. De même, cette géométrie sera «matérialisée» par des fonctions volumiques.

Puisque tout le traitement sera fait sur des triangles, il faut d'abord évaluer la façon de les représenter. Les données, à quelque niveau de subdivision que ce soit, comprennent essentiellement des «sommets», qui peuvent être considérés comme des points dans l'espace et des «arêtes» qui représentent des liens particuliers entre les sommets et qui définissent eux-mêmes des faces triangulaires. On peut donc envisager,

a priori, 3 grandes possibilités, selon l'information à retenir et traiter, comme étant des sommets, des arêtes ou des faces :

- l'approche par sommets : une approche uniquement basées sur des points ne nous permet pas de déduire l'appartenance de ces points à une entité logique à moins d'y associer un indice unique selon un formalisme qui peut s'avérer complexe puisqu'il doit permettre de repérer, à posteriori, les triangles et segments auxquels un point appartient ;
- l'approche par arêtes : une approche uniquement basée sur des segments nous oblige à reconstruire leur appartenance à des triangles. Pour ce faire, nous devons partir des deux sommets d'un segment pour repérer dans la liste tous ceux qui ont un sommet identique. Du segment trouvé on refait la même opération et finalement on vérifie si un des sommets dans cette dernière liste est identique au deuxième sommet du segment initial ;
- l'approche par faces : enfin une approche uniquement basée sur des triangles qui permet de traiter directement chaque triangle comme entité individuelle, du moins tant que l'on se limite à des subdivisions du premier type. Dans ce cas, une liste de triangles initiaux, subdivisés en deux ou en trois, donnera, après traitement, une nouvelle liste où chaque triangle initial sera remplacé par trois ou neuf triangles selon la subdivision demandée.

Après chaque subdivision, on revient donc à une nouvelle liste de triangles qui peut être traitée à nouveau de la même façon. On est donc dans une situation d'appel récursif de fonction, c'est-à-dire de fonction qui se rappelle elle-même en mettant à jour ses paramètres d'entrée au fur et à mesure. Les subdivisions faites, il faut cependant traiter géométriquement les sommets par une forme particulière de nœuds et les arêtes par une forme particulière de membrures.

- L'information pour la mise en forme physique

Quelle que soit l'approche, il faut être à même, pour chaque segment, sommet, ou face de parfaitement s'orienter dans l'espace pour le réaliser par le biais d'une forme spécifique. Pour traiter une membrure sous toutes ses formes possibles, nous devons connaître le segment à investir mais aussi les deux plans adjacents ainsi que le plan formé par le segment et le centre qui se trouve être le plan bissecteur des deux plans

adjacents. La capacité de retrouver, dans un traitement par triangles ceux qui sont adjacents à une arête permettra de le faire.

- L'identification

La mémorisation d'un point nécessite d'enregistrer 4 coordonnées qui peuvent être 4 nombres réels importants. Or, dans une liste de triangles, un sommet particulier peut être répété jusqu'à 9 fois puisqu'il peut appartenir à 9 triangles différents. On imagine tout de suite la mémoire qu'il va falloir utiliser pour décrire les triangles sous cette forme.

Il y a donc un net avantage à ne pas dupliquer l'enregistrement des coordonnées des sommets, c'est-à-dire à séparer la liste des sommets de la définition des triangles. Il suffit pour cela d'établir une liste de points identifiables par un indice et d'y référer dans une liste de triangles par le biais de l'indice.

De façon générale, un indice explicite associé à une donnée permet de qualifier les données et permet donc de regrouper, trier, filtrer ce que l'on veut selon l'encodage choisi. La gestion en est cependant plus lourde. Pour éviter cette gestion explicite mais générale on peut utiliser un indice implicite basé sur la position d'un élément dans une liste.

Cette approche est plus compacte mais nécessite de gérer parfaitement l'ordre des points puisque c'est sur la base de sa position dans une liste que l'on identifiera un point spécifique. Dans ce cas, il est à noter que toute suppression d'un élément dans la liste change l'indice des éléments qui suivent, ce qui n'est pas le cas d'indices explicites. On remarque aussi que le choix d'indices implicites rend la conservation de l'historique des événements plus complexe. Par exemple, un indice explicite pour identifier des triangles pourrait servir à identifier la filiation de la subdivision comme c'est le cas ci-après :

```
((a triangle_1) (b triangle_2)) ->
((aa triangle_1)(ab triangle_2)(ac triangle_3)(ad triangle_4)(ba triangle_5)(bb
triangle_6) ....) ->
((aaa triangle_1)(aab triangle_2) ... (bdd triangle_32)) -> et ainsi de suite.
```

Ainsi le triangle 32 est identifié comme le 4^e triangle du 4^e triangle du 2^e triangle de départ.

- Les répétitions

Une subdivision strictement géodésique d'un polyèdre régulier génère des patterns de répétition. Au départ, les 20 triangles de l'icosaèdre sont identiques hormis leur position dans l'espace. Aussi chacun peut référer au même «objet» et s'individualiser par une séquence particulière de rotation. Toute subdivision géodésique de cet «objet» de référence peut être reproduite dans l'espace par la même séquence.

Ainsi, toute projection de polyèdre régulier peut s'obtenir par la description d'un seul élément (triangle équilatéral, carré, pentagone, hexagone) et des groupes de symétrie (matrices) nécessaires pour obtenir les autres. Ainsi, la subdivision d'un élément sera reportée par simple multiplication matricielle sur l'ensemble de la sphère. Cependant, la projection par différents centres et sur différentes surfaces rendent cette approche impraticable. C'est pourquoi nous opterons pour un traitement géométrique individualisé de chaque triangle.

Pour les fins d'une figuration nous retiendrons la stratégie générale suivante :

- a) la morphologie sera décrite par des listes de triangles ;
- b) la description des triangles sera faite sous une forme symbolique. Ce symbole, de type numérique, identifiera chaque point par sa position dans une liste de points uniques ;
- c) les coordonnées des points seront consignées dans une liste unique de points ;
- d) l'adjacence des triangles sera obtenue par traitement de la liste des triangles ;
- e) la liste des arêtes sera obtenue par traitement de la liste des triangles ;
- f) la mise en forme des nœuds sera faite par une sphère dont le centre est au point considéré ;
- g) la mise en forme des membrures sera obtenue par un cylindre entre deux sommets ;
- h) la mise en forme des faces se fera par un triangle d'épaisseur donnée.

Tout autre mise en forme doit rester possible.

- Organisation du «discours» informatique

La structure du programme est définie par deux termes, la structure des fichiers manipulés et l'organisation des fonctions qui les traitent ou les produisent :

- La structure des fichiers. Nous avons retenu de représenter l'information par le biais de points uniques sous forme de coordonnées et par des triangles sous forme de symboles numériques référant à la position des sommets dans la liste de points. Or les fonctions peuvent accepter un nombre variable de paramètres en entrée mais ne renvoient que le dernier résultat, c'est-à-dire une seule information. C'est pourquoi nous avons adopté un formalisme d'une seule liste de 2 membres, une liste de points (liste de 4 coordonnées) et une liste de triangles (liste de 3 symboles). (liste (liste point 1, point 2, ... ,point n)(liste triangle 1, triangle 2, ... ,triangle n)).
- L'organisation des fonctions :
 1. (GEN_xxx arête fichier_géométrique)

Ce sont des fonctions qui génèrent les données géométriques de polyèdres réguliers selon la valeur de l'arête et qui les écrit dans un fichier géométrique.
 2. (GEOM_DEF fichier_géométrique_entrée fichier_géométrique_sortie)

Cette fonction permet de définir les paramètres de traitement géométrique des données, de lancer leur exécution et d'écrire le résultat géométrique dans un fichier de sortie.
 3. (GEOM_EXE data_géométriques paramètres d'exécution)

Cette fonction traite les données géométriques selon les paramètres d'exécution définis précédemment et produit en retour de nouvelles données géométriques
 4. (VOLU_DEF fichier_géométrique fichier_volumique)

Cette fonction permet de définir les paramètres de matérialisation physique des données géométriques, de lancer l'exécution des solides et d'écrire le résultat volumique dans un fichier sortie.
 5. (VOLU_EXE data_géométriques paramètres d'exécution)

Cette fonction traite les données géométriques selon les paramètres d'exécution définis précédemment et donne en retour un fichier volumique.

6. (VUES_DEF data_volumiques)

Cette fonction permet de définir les paramètres de visualisation d'un volume et construit l'image correspondante qu'elle écrit dans un fichier.

7. (GEODESIC).

Au sommet de cette organisation, on aura une fonction générale, sans paramètres, qui permet de définir les tâches à exécuter ainsi que de définir les fichiers d'entrée-sortie de chaque tâche générale.

Cette organisation a plusieurs avantages : le travail propre au traitement géométrique (sommets, arêtes et projections) peut être fait indépendamment de toute matérialisation physique (nœuds, membrures ou panneaux) et servir d'entrée à diverses formalisations sans nécessiter la reprise du calcul. Ce fichier géométrique (points et triangles) peut être combiné à d'autres. Ceci permet, entre autres, de réaliser le pavillon des États-Unis dont l'hémisphère supérieure est faite d'une façon alors que le reste est fait d'une autre, ce qui implique deux traitements différents. De même un calcul d'envergure peut à la limite être traité en plusieurs passes.

Le fichier volumique peut à son tour être repris pour produire diverses images selon le point de vue ou la lumière sans reprendre le calcul. Cela permet aussi de combiner divers objets calculés dans une scène plus générale. Par exemple, on pourra combiner les fichiers du dôme du pavillon des États-Unis avec celui de sa base ou des bâtiments qu'il enveloppe pour produire une scène plus complète.

On a donc une structure de génération et de contrôle par étapes qui permet plus de souplesse pour atteindre les divers objectifs que l'on s'est fixés. Enfin, la quantité de paramètres à définir pour rendre compte de toutes les options possibles ne permettait pas d'appeler des fonctions paramétrées. Aussi ces choix sont possibles en éditant un fichier avec le dialecte *Scheme* ou chaque paramètre est défini, modifiable et explicité :

- (GEODESIC) : définit les tâches comme l'exécution d'un fichier géométrique, volumique ou d'une image et permet de nommer les fichiers d'entrée et de sortie pour usage ultérieur ou de lancer le tout en chaîne ;
- (GEOM_DEF) : définit les paramètres de traitement géométrique comme la séquence et les types de subdivision, la quadrique de projection et le centre de projection ;
- (VOLUME_DEF) : définit les paramètres volumiques comme la couleur et le rayon des nœuds ou des membrures ainsi que l'épaisseur, la couleur et le type de panneaux ;
- (VUES_DEF) : définit la scène comme la position de l'observateur, le centre de visée, le cône de vision et la grandeur de l'image ainsi que sa matérialisation par un affichage sur l'écran ou l'écriture d'un fichier *bitmap*. (Parisel, 1997)

9.4.1.2 *Le cas des voûtes byzantines (Bogdan, 1997)*

Ce qui distingue avant tout le système de construction byzantin de ceux de l'Empire romain occidental est le fait qu'en Orient, même après la conquête romaine, des procédés et des techniques de construction multimillénaires ont survécu. Ce fait est évident surtout en ce qui concerne l'élément principal de l'art byzantin - la voûte. Si la voûte romaine était un massif monolithique de pierre et de mortier qui témoignait plus d'une approche disposant de gros moyens que d'une approche intelligente, la voûte byzantine est remarquable par la subtilité de sa construction. Exécutée en brique, par des tranches verticales, elle est d'autant plus extraordinaire qu'elle est construite sans cintres. Ce système a des racines très anciennes, des exemples de ce type de construction pouvant être retrouvés, en Égypte ou dans l'empire perse.

Pour mieux saisir l'ingéniosité et l'élégance de la voûte d'arête byzantine, il convient d'abord de se pencher sur les principes de la construction sans cintrage appliqués aux voûtes en berceau. Les Byzantins se servaient comme base de départ d'un mur de tête (ou d'un arc bâti sur cintre). Avec du mortier ils faisaient adhérer à ce plan une première tranche de briques, auxquelles se rajoutait une deuxième, et ainsi de suite, tant que la tranche n'était pas finie, les briques étaient soutenues seulement par la force d'adhérence du mortier... En effet, dès qu'une tranche était réalisée, elle était aussitôt

recouverte d'une couche de mortier pour la consolider. Ensuite, c'est contre cet enduit qu'on maçonnerait la tranche suivante, en rajoutant donc encore du mortier, d'où son épaisseur importante.

Afin d'obtenir un résultat qui permette de modéliser toutes les voûtes d'arêtes byzantines construites selon les principes décrits dans le chapitre précédent, on a fait appel à la programmation fonctionnelle et à un langage fonctionnel pour la description de la démarche logique de conception et de construction des objets. Les programmes obtenus permettent ainsi la modélisation de tout objet particulier répondant à la logique de conception et de construction respective.

Autrement dit, cette technologie nous a permis d'aboutir à une fonction qui «attend» une série de paramètres permettant de générer toutes les voûtes construites selon les principes de construction des voûtes d'arêtes byzantines.

Cette méthode peut être appliquée à la modélisation de n'importe quel système de construction. D'une façon similaire à celle des constructeurs byzantins, on a d'abord identifié la forme que la voûte devait couvrir. Pour mettre l'accent sur le processus de modélisation, on a réduit le problème à la voûte de plan carré. Dans le cas des voûtes de plan rectangulaire, la marche à suivre est similaire. (Figure 81)

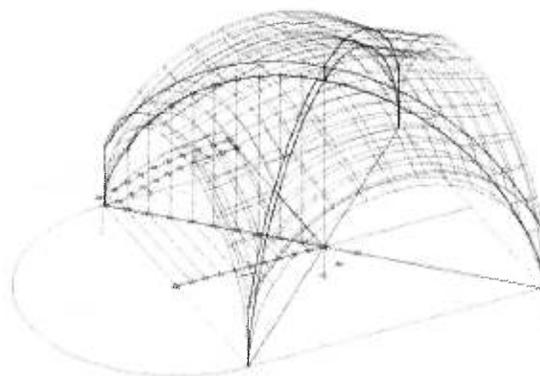


Figure 81. Illustration du principe de construction, processus de modélisation (C. Parisel, 1995)

Ensuite, on a tracé (d'une manière algébrique) l'arc diagonal surbaissé. Cet arc, ainsi que l'axe du plan de naissance de la voûte, a été divisé par l'intersection avec une liste de plans parallèles équidistants correspondant aux tranches de briques.

Finalement on a tracé, d'une manière qui correspond aux gabarits volants des maçons byzantins, les arcs dont les centres parcourent les points situés sur l'axe horizontal, et dont le point de passage est situé sur l'arc diagonal, dans le plan parallèle respectif.

Afin de rendre plus explicite le résultat obtenu on a rajouté des arcs formerets (les arcs sur lesquels prennent appui les premières tranches de brique) et on a différencié par la couleur la brique et le mortier. La voûte obtenue se présente sous la forme d'une fonction :

M-voûtebyzantine (n h k) où
 n=la largeur de la voûte,
 h=le surbaissement,
 k=le nombre de tranches de brique.

Les autres éléments, comme l'épaisseur de la voûte, la profondeur des arcs formerets ou l'inclinaison des tranches peuvent être contrôlés dans le script même. La simulation sur ordinateur nous permet de pousser les paramètres au-delà des limites constructives. (Figure 82)

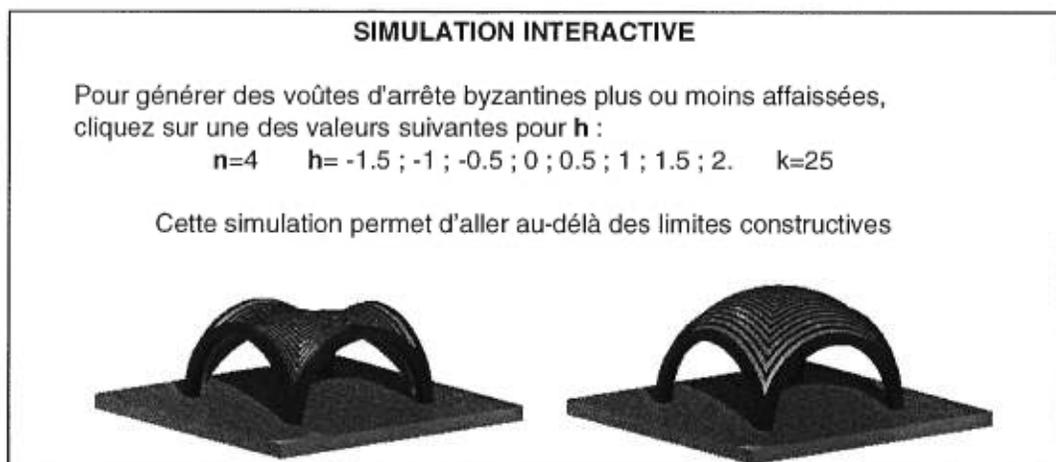


Figure 82. Simulation interactive des limites constructives (M. Bogdan, 1996)

Enfin, la description logique du processus de construction et son codage informatisé (traduit sous forme de fonctions) permettent d'aboutir à un résultat

extrêmement compact, très clair et totalement paramétrable. (Bogdan, 1997) (Figure 83 et 84)

<pre>;; Définition des points de contrôle de la voûte ;; (define Mboules_controle (lambda (n h) (DLmax (DLatt (SDcolRGB (vector 0 1 0 1)) (GDSphdis (vector 0.1 1) (vector 0 0 0 n))) (DLatt (SDcolRGB (vector 0 1 0 1)) (GDSphdis (vector 0.1 1) (vector n 0 0 1))) (DLatt (SDcolRGB (vector 0 1 0 1)) (GDSphdis (vector 0.1 1) (vector n 0 0 1))) (DLatt (SDcolRGB (vector 1 0 0 1)) (GDSphdis (vector 0.2 1) (vector (/ n 2) (- h) (/ n 2) 1)))))) suite...</pre>	<pre>;; Définition des points de contrôle de la voûte, suite ;; (SDcolRGB (vector 0 1 0 1)) (GDSphdis (vector 0.1 1) (vector n 0 n 1))) (DLatt (SDcolRGB (vector 0 1 0 1)) (GDSphdis (vector 0.1 1) (vector 0 0 n 1))) (DLatt (SDcolRGB (vector 1 0 0 1)) (GDSphdis (vector 0.2 1) (vector (/ n 2) (- h) (/ n 2) 1))))))</pre>
---	---

Figure 83. Exemples de programmes de modélisation de la voûte, écrits en langage fonctionnel

<pre>;;Visualisation de la construction de la voûte ;; (define Mprovisoire (lambda (n h k) (DLmax (Marc_diagonal n h) (Mboules_controle n h) (M-boulesbleu2 n h k) (M-tousmorceaux n h k)))) ; (M-bbbls (M-ptsychange n h k)) ; (M-bbbls (M-ptsrotation n h k)) ; (M-bbbls (M-ptsintbas n h k)) ; (M-bbbls (M-ptsplushaut n h k)))))) ; (M-bbbls (M-ptsychangerot0 n h k)) ; (M-bbbls (M-ptsychangerot1 n h k)) ; (M-bbbls (M-ptsplushautrot0 n h k)) ; (M-bbbls (M-ptsplushautrot1 n h k)))))) suite...</pre>	<pre>;;Visualisation de la construction de la voûte, suite ;; (pisobs (vector 1.3 0.35 1 0)) (define Voutebiz (lambda (n h k) (begin (pistarget (vector 2 1 2 1)) (pisbox (vector 12 8)) (PIswin (vector 900 600)) (PIview (PIgen (Mprovisoire n h k) "marius") "marius")))))</pre>
--	---

Figure 84. Exemples de programmes de modélisation de la voûte, écrits en langage fonctionnel

Ces exemples encyclopédiques sont loin d'être complets, parce que le concept même de l'encyclopédie est celui d'un enrichissement sans fin. Ils doivent servir de modèle d'interprétation volumique pour tout chercheur qui désirerait utiliser un système d'aide à la conception gouverné par le concepteur plutôt que par l'ordinateur. Cette méthode se différencie des méthodes traditionnelles d'utilisation des banques de données par sa façon de décrire les «précédents», ce qui permet, comme le soulignait M. Léglièse (1997), en présentant une voie d'aide à la conception par un «carnet informatisé», d'extraire les fragments de connaissances qu'il reconnaît dans des œuvres choisies et de les interpréter.

En conclusion, une encyclopédie signifie enrichir ses connaissances et en même temps chercher les liens communs. Cette approche se différencie de celle de type analogique «pur» par l'approche «discours» plutôt que par images et textes. Cette stratégie est totalement indépendante de la nature de l'objet et, comme le soulignent C.

Parisel et A. Pho (1996), elle peut s'appliquer aussi bien à un meuble, un ouvrage d'ingénierie, un ouvrage construit, un paysage qu'à une ville. De ce fait, elle est indépendante de l'échelle de temps adoptée.

Il n'y a donc pas d'analyse critique de ces deux exemples, le lecteur pourra trouver et interpréter à sa manière, comme tout concepteur, leur valeur «cognitive» et l'utilité des «discours» procéduraux dans l'expérimentation présentée dans la dernière partie de cette thèse sur le théâtre de Vitruve.

9.5 Les représentations spatiales par les modèles informatiques

Lors de la création d'un programme informatique, les informations que nous donnons à la machine sont des textes et il est normal pour en comprendre les mécanismes, de faire appel aux connaissances en linguistique ou à la logique. Ces disciplines sont celles qui s'intéressent depuis leur origine à la notion de symbole et aujourd'hui, de connaissance et de représentation. Quand nous étudions un texte, ce que nous cherchons c'est de comprendre sa signification qui est déterminée par une série de conventions. Par exemple, des conventions acceptées par la communauté qui parle et écrit la même langue.

Les mathématiciens ont dépassé ce stade et ils ont cherché à déterminer la signification des textes sans faire référence à un ensemble de conventions jugées arbitraires : c'est dans ce but qu'ils ont introduit la notion de système symbolique. De cette façon, le rapport entre le texte et ce qu'il désigne est une relation de «représentation symbolique», qui suppose une relation d'analogie. (Ganascia, 1997) Pour avoir une signification, le texte devra utiliser des signes qui ont tous une signification et qui doivent être liés entre eux par des règles grammaticales. Ces règles permettent de structurer le texte et de repérer les articulations ainsi que les phrases, en épurant le langage pour réduire les imperfections. On qualifie de langages formels, les langages définis mathématiquement par le biais d'un alphabet et des règles de grammaire qui permettent de créer des ensembles de mots et des séquences.

Par exemple, prenons un langage formel composé de quatre lettres : C I A O et de la règle qui établit que les expressions doivent contenir une seule lettre C, une seule

lettre A, une seule lettre O et un nombre quelconque de I. Nous pouvons donc créer toute une série de combinaisons qui peuvent être vraies ou non, selon qu'elles respectent la règle. Par exemple CAO est vrai, mais CIA est faux. Nous pouvons aussi continuer en remarquant que nous pouvons créer un instrument qui a un sens, mais pas encore une signification. Pour cela, il faudra attribuer, par exemple, une signification aux expressions de ce langage. Par exemple, la lettre C pourrait signifier multiplication et la lettre I égal. Mais pour rendre vivant ce langage, il faudra que l'ordinateur puisse comprendre la signification des expressions qu'il doit manipuler. C'est pour cela qu'on fait appel aux systèmes symboliques qui permettent la description mathématique et la construction d'objets informatiques complexes. Ces systèmes symboliques sont des instruments qui décrivent formellement l'activité mathématique par des règles de dérivation et des théorèmes dans un langage formel précédemment défini. (Ganascia, 1997)

Les développements des dernières décennies ont permis la création de toute une série de langages diversifiés selon les besoins et les techniques utilisées. Nous avons des langages impératifs, fonctionnels, logiques ou encore par objet. Selon les spécialités, ces langages permettent de modéliser des activités d'un système informatique ou la modélisation et la visualisation et la conception de scènes. Cette étude s'intéresse particulièrement à la mise en œuvre de langages qui permettent d'offrir des fonctions pour la conception de scènes et plus particulièrement en architecture.

Selon P. Jorrand, directeur de recherche au CNRS à Grenoble, «En dépit des méthodes, des environnements, des outils, la programmation est un art et demeure un art. Elle est l'art de l'artisan qui connaît bien les matières qu'il emploie. Elle est l'art de l'artiste qui y met souvent beaucoup de lui-même, parfois avec une certaine passion». (Hufflen, 1996, p. 6) Et, comme le souligne Hufflen, «il est réaliste d'imaginer que tout scientifique sera un jour appelé à devoir programmer une de ses applications ou, à défaut, être le client d'une société de services informatiques à qui il commandera un tel travail».

C'est pourquoi, sans tenter de présenter un panorama des divers langages utilisés actuellement, il m'apparaît nécessaire de présenter quelques points importants qui peuvent aider à la compréhension du discours informatique. Tout particulièrement pour souligner les changements de paradigme des dernières années, où, en regardant l'évolution et l'histoire des langages informatiques, on s'aperçoit qu'ils s'éloignent de

plus en plus de la machine ordinateur. «C'est dans ce sens que de tels langages sont appelés de *haut niveau*, par opposition aux langages de *bas niveau*, composés d'ordres directement exécutables par une machine particulière. Programmer dans un langage de haut niveau consiste davantage à décrire ce que l'on cherche à obtenir, et non à expliciter dans les moindres détails les multiples opérations qu'une machine particulière devra effectuer dans ce but». (1996, p. 13)

P. Hernert souligne que l'écriture d'un programme implique de prendre en considération des données ou des valeurs qui ne sont pas déterminées *a priori*. Ces données sont appelées variables et elles portent un nom qui a peu d'importance pour le programme lui-même, mais qui est une référence pour l'utilisateur :

«Un programme manipule des données, essentiellement caractérisées par un type et une valeur. Le premier détermine le format de la donnée en mémoire, selon des normes rigoureuses dépendant du langage dans lequel le programme est écrit. Il décide également des opérations qui peuvent être effectuées sur la donnée. La seconde exprime simplement ce que vaut, à un instant déterminé, cette donnée. La notion de variable en informatique rejoint celle d'algèbre.» (1995, p. 5)

Pour revenir aux langages, qui permettent d'offrir des fonctions pour la conception de scènes, et plus particulièrement en architecture, J.F. Rotgé souligne que «l'aménagement de l'espace qui nous entoure est une démarche qui s'accompagne nécessairement de sa maîtrise géométrique». L'auteur nous dit que les architectes doivent pouvoir communiquer entre eux, «en utilisant des codes qui peuvent être fortement implicites lorsqu'ils empruntent des langages naturels ou plus généralement font appel à des conventions. Dans ce sens, le dessin technique en 2 ou 3 dimensions s'avère être un moyen de communication parfaitement implicite de la connaissance géométrique de l'espace». (1997, p. 3)

Rotgé souligne aussi que, indépendamment de la manière utilisée pour véhiculer l'information spatiale, la description des formes spatiales peut passer par une méthodologie soit représentative soit générative. Et que la transmission à un ordinateur des connaissances géométriques des formes spatiales est radicalement différente : «elle est de nature exclusivement explicite et la structuration logique de l'information transmise obéit nécessairement à l'une des représentations reconnaissables par la machine». (1997, p. 4) L'auteur nous propose une méthodologie arithmétique qui, au lieu de s'appuyer sur une méthodologie conventionnelle de transmission de la

connaissance algorithmique spatiale, s'appuie sur une méthodologie mathématique. (Figure 85)

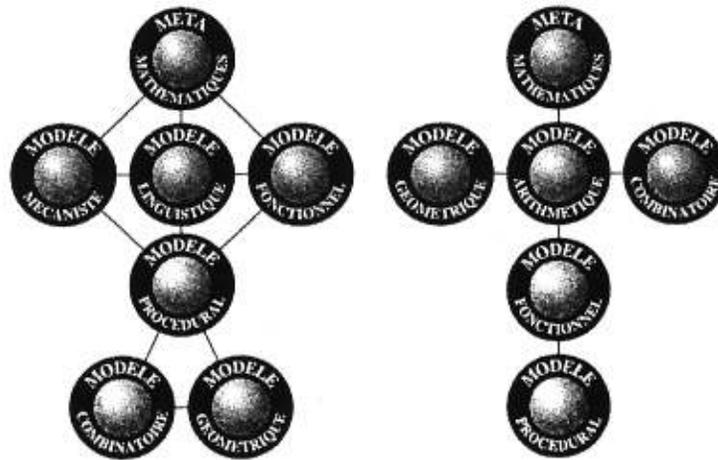


Figure 85. Approche conventionnelle et arithmétique (J.-F. Rotgé, 1997)

Enfin, J.-F. Rotgé, en analysant les stratégies de programmation volumique, souligne que : «la définition algorithmique d'un volume est basée sur la manière dont certaines régions de l'espace vont être particularisées géométriquement et isolées combinatoirement. Ces stratégies volumiques obéissent essentiellement à trois schémas de programmation : la programmation arborescente, la programmation itérative et récursive».

Dans la programmation arborescente, «un volume est défini par une structure arborescente qui spécifie la manière dont certains volumes élémentaires sont assemblés [...] La programmation stéréotomique est un bon exemple de programmation arborescente». La programmation itérative et récursive intervient quand on est amené à utiliser des instructions qui permettent la description de mécanismes répétitifs, qui peuvent être récursifs ou itératifs, parce que la modélisation d'objets ou de scènes comprend des répétitions d'objets semblables ou des variantes de ces objets. Dans la programmation itérative «un volume est défini par un mécanisme itératif qui spécifie la manière dont un volume élémentaire est répété pour constituer un volume plus complexe [...] la programmation des volumes moulures est un exemple de programmation itérative». Enfin, dans la programmation récursive, un volume élémentaire est utilisé «pour générer un volume plus complexe, qui, à son tour va servir autant de fois que le programmeur le désirera». (Rotgé, 1997, pp. 225-227)

J'ai déjà souligné qu'il existe différents modèles informatiques créés pour l'aide à la conception par ordinateur et que les recherches sur ces modèles sont actives depuis le début des années 60. Selon Beatrix de Cambray, elles «sont basées sur des théories mathématiques comme les r-ensembles, la formule d'Euler-Poincaré...»¹ et elles peuvent être classées selon deux grandes catégories : les CGS (*Constructive Solid Modeling*), où nous avons les modèles voxel, décomposition en cellules, octree et extension de l'octree, et les BR (*Boundary Representation*).

Les besoins de l'ingénierie ont grandement influencé les recherches et développements des systèmes de modélisation, tout particulièrement en ce qui a trait à la représentation visuelle des objets volumiques, ce qui a amené à une investigation sur la reconnaissance des classes d'objets volumiques par leurs propriétés géométriques et à choisir les opérations volumiques en fonction de leur adaptation «avec la nature des résultats attendus — par la machine — et ensuite en fonction de leur relative facilité d'apprentissage — par l'utilisateur —». (1997, p. 11) Par exemple, le système B-Rep est représentatif de cette perception pratique et efficace de la modélisation.

J.-F. Rotgé fait remarquer que le système CSG est un système où l'objet volumique a été défini de manière constructive et procédurale à partir d'un vocabulaire de primitives géométriques et d'une série d'opérations de construction, tout en soulignant que l'une des ambiguïtés du système est que le modèle mathématique n'est pas nécessairement le reflet du processus de conception ou de construction de l'objet réel. Et il ajoute, à propos de ces classements, que «du point de vue du théoricien de l'informatique, la distinction essentielle qu'il convient de faire entre systèmes de

¹ «La formule d'Euler, appelée aussi formule d'Euler-Poincaré, est une formule de base de la topologie... (elle) est vérifiée par des objets dont la forme correspond à la dimension de l'espace considéré (l'objet doit être de dimension homogène et sa dimension doit être égale à celle de l'espace. Ainsi, en dimension trois, un objet à face pendante est un contre-exemple puisque la face isolée est de dimension deux) et qui sont topologiquement bien formés. Par exemple, dans l'espace à trois dimensions, un cube vérifie la formule d'Euler-Poincaré alors qu'un cube avec une face qui pend ne le vérifie pas. La bouteille de Klein, qui est un objet mal formé du point de vue topologique car non orientable, ne vérifie pas la formule d'Euler-Poincaré...» la formule d'Euler-Poincaré pour un polyèdre simple est :

$$s-c+f=2$$

où s,c et f sont respectivement les nombres de sommets, côtés et faces.

Pour un polyèdre arbitraire, cette formule se généralise en :

$$s-c+f=2*(s-g)+a$$

où s est le nombre de sommets, c le nombre de cotés, f le nombre de faces, s le nombre de coquilles (*shells*), g le genre de l'objet (i.e. le nombre total de trous à travers le solide) et a le nombre total d'anneaux (i.e. cavités dans les faces) (B. de Cambray ,1992, p.17, et A. Baer, C. Eastman, M, Henrion, *Geometric Modelling : a survey, Computer Aided Design*, vol. 11, N. 5, septembre 1979, pp.253-272)

modélisation volumique s'établit autour du concept qui accompagne 3 modèles d'informatique théorique (Krishnamurthy, 1989) :

- les modèles mécanistes basés sur le concept d'automate et de machine virtuelle (Turing) ;
- les modèles linguistiques ou à production, basés sur les concepts de langage formel, grammaire, vocabulaire et règles de production (Chomsky, Post, Markov) ;
- les modèles fonctionnels, basés sur les concepts de fonction récursive et de lambda-calcul (Gödel, Kleene, Church). Les branches des mathématiques reliées au modèle fonctionnel sont la logique, la théorie des ensembles et l'algèbre.» (1997, p. 12)

Rotgé souligne que selon les systèmes de modélisation volumique de nature algorithmique, certains intègrent cette classification, d'autres non. Et il donne l'exemple du système B-Rep qui, dans son état «pur» est un exemple de système non algorithmique qui peut quand même être lié aux modèles linguistiques et que le CGS pourrait appartenir aux modèles fonctionnels, parce que basé sur la logique booléenne, l'algèbre et la théorie des ensembles.

Tout au long de ces investigations, j'ai été amené à étudier et tester plusieurs systèmes de modélisation volumique, certains inédits. Et je suis arrivé à la conclusion que dans ce domaine aussi, le classement peut inhiber un développement de la représentation spatiale de la forme, avec une approche réductrice. Mon intérêt dans cette investigation est de comprendre s'il y a la possibilité de créer des liens dialectiques entre ces systèmes et de les considérer «ouverts» à des supra-liens qui permettraient selon les besoins, d'utiliser aussi un noyau ou moteur de traitement de l'information plutôt qu'un autre et de voir comment les concepteurs-architectes peuvent s'approprier ces systèmes.

J'ai étudié plusieurs systèmes complémentaires et qui représentent une vision proche des préoccupations de l'architecte dans sa première phase de conception. Ces systèmes utilisent des langages de programmation qui peuvent être différents, mais leurs limites actuelles ne sont que temporaires. Cependant, elles ne doivent pas nous arrêter. Rappelons-nous que Pascal, au XVII^e siècle, se posait des questions qui ont eu une réponse partielle seulement deux siècles après et que c'est seulement à la fin du XX^e siècle que les chercheurs en informatique commencent à délaissier la «machine», objet analogique sans connaissance pour une machine «heuristique» où les connaissances sont transférables de l'objet à l'objet et de l'objet à l'homme.

En analysant les recherches sur la perception, je me suis posé la question de savoir si penser et voir sont vraiment distincts. Cette même question je peux la reformuler dans cette partie de l'étude sur les langages informatiques et les systèmes de représentation volumique, en rappelant que c'est aussi l'éternelle interrogation de tous les acteurs du processus de conception autour de l'«objet» architectural.

Nicholas Negroponte, dans ses réflexions sur l'homme numérique et sur les changements du paradigme de communication actuel, nous rappelle les difficultés de transférer seulement par des textes épurés notre pensée à une machine :

«La parole est un média souvent rempli de sons qu'on ne trouve pas dans un dictionnaire. Non seulement la parole est plus riche en nuances qu'un texte en noir et blanc, mais elle peut gagner en sens grâce à certains éléments du discours, euh, c'est-à-dire, enfin, euh, le paraverbe quoi!» (1995, p. 179)

Il nous dit que, fort probablement d'ici quelques temps, comme pour tout ce qui touche le numérique, la solution sera d'utiliser les textes et la parole. Nous avons un besoin, en tant qu'architectes et que concepteurs, de nous référer, d'une façon consciente ou non, à des mots et à des notes ainsi qu'à des esquisses déjà produites pour les re-interpréter. C'est un peu ce que M. Légliose, en 1990 et R. Oxman, en 1993, proposent : un système de représentation qui tienne compte de la présence de «librairies» virtuelles qui nous permettent de dé-construire et re-construire la représentation volumique de l'objet architectural. Ces réflexions veulent, une fois de plus souligner la complexité des notions de perception et de conception et me permettent de rappeler l'intuition qui m'anime et qui veut que l'informatique soit une discipline fédérative pour tous les acteurs, pendant le processus de conception.

Toujours selon N. Negroponte, par exemple, lire cette page signifie demander à nos yeux et à notre cerveau de convertir l'imprimé en signaux que nous pouvons traiter et reconnaître comme des lettres et des mots ayant un sens. Aussi, l'ordinateur, pour interpréter le contenu d'une image, doit passer par un système de reconnaissance semblable : convertir des petites zones de pixels en lettres et celles-ci en mots. Et en essayant de ne pas confondre, par exemple, la lettre O du chiffre 0, différencier le texte des notes ou des images pour le transformer en une représentation numérique qui n'est plus une image mais un ensemble de données structurées sous la forme de lettres codées

sous la représentation binaire que l'on appelle couramment ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*).

C'est aussi le cas du projet d'architecture, et par extension de sa représentation par un système de modélisation : les acteurs pendant le processus de conception doivent interpréter le contenu de l'image, non seulement de l'image visible, mais aussi de l'information invisible, qui permet, par des artifices de programmation, d'utiliser d'autres opérateurs que les opérateurs géométriques et de procéder d'une façon itérative en transformant l'image en représentation numérique et la représentation numérique en image.

Il s'agit finalement de comprendre la notion de «projet» en architecture, et dans un sens plus large en aménagement, et de diriger la réflexion vers une approche qui, tout en consolidant les acquis actuels, valorise la logique et la compréhension du langage du «visible» et du non «visible». C'est sous cette différenciation, qui ne se veut pas une classification, et pour comprendre les architectes lors de leur travail de conception, que j'ai étudié, parfois comme observateur parfois comme acteur, un certain nombre de langages :

- un exemple de langage du non «visible» : le langage *Scheme* et les fonctions géométriques de SGDL ;
- un exemple de langage du «visible» : le langage FP ;
- un exemple de langage «causal-probabiliste» : le langage à objets SOML.

Il est évident que ce type de différenciation est fait du point de vue de l'architecte et non de l'informaticien. Avant tout, l'architecte utilise normalement le langage symbolique et en utilisant des symboles, il communique sa pensée, et ce langage, pour être utilisé par un ordinateur, doit être informatique. Selon les canons classiques de l'informatique, parmi les langages dits évolués, nous pouvons, distinguer, en fonction de leurs objectifs, trois types de langages : les langages impératifs, parmi lesquels nous retrouvons les langages Pascal, C ou Fortran ; les langages orientés objet, tels C++ ou Java ; et les langages fonctionnels dont le *Lisp* (*LISt Processing*) pur, développé par J. McCarthy au MIT, l'ancêtre, et le dialecte *Scheme* qui représente un *Lisp* épuré, un des descendants.

Ces types de langages fonctionnels ont été mis au point pour «permettre à un ordinateur de traiter des méthodes pour la résolution de problèmes» et il sont les mieux adaptés pour la description de processus. (Tidafi, 1996, p.256 ; Abelson, 1989) Selon J.-M. Hufflen, dans la présentation de son livre sur la programmation fonctionnelle en *Scheme*, ce langage appartient à une famille de langages de très haut niveau «dont la base commune consiste en la programmation de calculs sur des *valeurs* — ou *objets* — (par exemple des entiers naturels ou des nombres réels) et des *fonctions*, et ceci au sens mathématique de ces deux termes : étant donné les *arguments* (*valeurs*) pris dans un ensemble de départ, une fonction retourne leur *image*. C'est dans ce sens que l'on parle de programmation fonctionnelle¹». (1996, p. 14) Finalement, de ces langages informatiques ce que j'ai voulu souligner, ce n'est pas tant l'aspect technique, mais les méthodes utilisées pour aborder un problème réel et c'est de cette façon que je traiterai à l'occasion des langages informatiques que j'ai pu utiliser dans mes expériences.

9.5.1 Un exemple de langage du «non visible»

Depuis le début de mes recherches sur la logique et la compréhension des langages, j'ai été sensibilisé aux travaux du Groupe de Recherche en CAO de la Faculté de l'Aménagement de l'Université de Montréal qui utilisait, pour la modélisation et la simulation intelligente de l'aménagement volumique de l'espace, le logiciel SGDL qui associe la modélisation et la programmation géométrique.

Les particularités de ce logiciel ont été amplement traitées par J.-F. Rotgé dans sa thèse de doctorat qui développe les principes théoriques à la base du logiciel SGDL. (1997) D'autres travaux, dont ceux de T. Tidafi (1996), C. Parisel et A. Pho Dieu-Hanh (1996) présentent les caractéristiques principales de ce logiciel et de son utilisation.

Dans ces travaux, les chercheurs ont voulu, par des exemples de reconstitution et d'automatisation du processus de construction, obtenir des maquettes volumiques non seulement conformes à la réalité, mais contrôlables et manipulables suivant les processus de conception et de construction. C'est justement par ce type d'approche que j'ai défini ce langage comme un langage du «non visible». En effet, les objectifs

¹ Certains auteurs parlent de programmation *applicative*. Ils traduisent le fait que les programmes sont alors composés *d'applications* de fonctions à des valeurs (J.-M. Hufflen, 1996, p.14)

poursuivis dans la plupart des travaux ont été par exemple, de programmer des contraintes cinématiques pour un modèle de lampe¹ (T. Tidafi, 1996), ou d'étudier les relations de dépendance géométrique des différentes parties d'une église², ou encore de réaliser une maquette faisant état des modifications d'un bâtiment dans le temps³, ou enfin, pour réaliser des exemples de modèles mathématiques qui illustrent des concepts géométriques.

Selon J.-F. Rotgé, la modélisation volumique en architecture obéit à une approche selon laquelle le processus de modélisation intervient essentiellement au stade de la conception :

«Le processus de modélisation (en architecture) intervient essentiellement au stade de la conception et l'approche mathématique est alors privilégiée. Cette approche favorise principalement la démarche géométrique sous sa forme purement graphique, c'est-à-dire synthétique, et la démarche syntaxique qui permet de formaliser grammaticalement les styles et les opérations volumiques architecturales. Certains travaux explorent alors les relations entre les grammaires et la géométrie. L'informatique formalise la jonction entre les deux domaines au travers de la théorie des langages.» (1997, p. 7)

Et, en soulignant la difficulté de formaliser le raisonnement géométrique et de le transmettre dans un langage reconnaissable par des machines existantes, l'auteur tente de répondre à cette problématique en privilégiant, pour la modélisation volumique, l'approche informatique, en unifiant «dans un langage unique, logique, topologie, géométrie et bases de données». (1997, p. 8) Ce logiciel présente une approche méthodologique et algorithmique qui permet d'informatiser, naturellement et en l'optimisant, le processus de conception volumique. Ce qui lui permet de décrire, produire, contrôler et visualiser toute scène volumique.

¹ « L'étude de la lampe Tizio par T. Tidafi est considérée sous cet angle. Les contraintes mécaniques forment l'essentiel des préoccupations du programmeur. » (Rotgé, 1997, p. 229)

² Il s'agit de l'église néo-gothique de St-Eustache de Paris, analysée et modélisée par T. Tidafi. «Les relations de dépendance géométrique des différentes parties de l'église ont été programmées en utilisant le concept d'hexaèdre projectif du point de vue constructif.» (Rotgé, 1997, p. 228)

³ Il s'agit de la Vieille Douane de Montréal analysée et modélisée par Alice D.H. Pho. «L'objectif visé est de réaliser une maquette spatio-temporelle [...] L'idée principale est de faire coïncider datation et modélisation dans un premier temps grâce à une définition du bâtiment [...] Un travail poursuivant les mêmes objectifs mais plus ambitieux du point de vue algorithmique consiste à remplacer les clauses conditionnelles de la programmation (IF) par la gödelisation de l'information spatio-temporelle». (Rotgé, 1997, p. 228)

T. Tidafi, dans la conceptualisation d'une méthode pour la figuration architecturale, présente le système SGDL utilisé pour les descriptions, contrôles et visualisations des scènes volumiques qu'il a réalisées, en disant que :

«il constitue un outil géométrique permettant de définir une forme de façon logique, volumique et précise tout en offrant l'avantage de considérer des transformations géométriques. Sa mise en place informatique est réalisée sur la base du lambda-calcul à l'origine des langages symboliques fonctionnels. Le système SGDL complète le langage *Scheme* par des *fonctions* géométriques. Les caractéristiques géométriques et informatiques du système SGDL font que parmi les systèmes géométriques disponibles, ce système est celui qui convient le mieux pour la modélisation d'actions.» (1996, p. 262)

L'analyse des travaux qui ont utilisé ce langage m'a permis d'explorer dans quels contextes et de quelle façon le langage *Scheme*, complété par les fonctions géométriques de SGDL, pouvait être utilisé pour visualiser des modèles riches en sémantique mais encore pauvres en géométrie comme c'est le cas de l'esquisse, pendant la première phase de la conception architecturale et de voir si l'on pouvait garder cette sémantique tout au long de la modélisation de l'objet pour proposer la création d'une encyclopédie discursive dont j'ai présenté les caractéristiques.

9.5.2 Un exemple de langage du «visible»

Les travaux de recherche présentés aux derniers congrès sur la conception assistée par ordinateur en architecture montrent de plus en plus le «non sens» de vouloir traiter un problème informatique à l'aide d'un logiciel «à tout faire» et d'un langage de programmation idéal. Le nombre de dialectes qui ont vu le jour depuis la naissance du *Lisp pur*, montre la difficulté que pose le traitement des données dans la description d'une suite d'opérations. Ce type de description, consiste en «une suite d'opérations élémentaires non ambiguë, qui s'achèvent après un nombre fini d'étapes» pour produire un résultat, l'algorithme, notion formellement étudiée depuis le début du XX^e siècle, et bien avant les premiers ordinateurs. (P. Hernert, 1995, p. 3)

L'ordinateur a, au tout début, servi d'accélérateur de ces données en permettant la solution de problèmes jusqu'alors simulés par des machines abstraites. Par la suite, il a contribué à un essor dans l'étude des types d'algorithmes et a montré la nécessité de

disposer de ce type de descriptions toujours plus complexes et adaptées à des activités humaines différentes. J.-M. Hufflen, nous rappelle qu'après la première tentative d'élaborer un langage de programmation à partir du lambda-calcul¹ (McCarty, 1960) et l'élaboration en 1962 du *Lisp pur*, plusieurs dialectes ont vu le jour. Ces dialectes ont incorporé beaucoup d'autres aspects et avec un souci d'homogénéité qui les a fait évoluer vers des «systèmes riches et robustes comportant entre autres fonctionnalités, des outils puissants d'aide à la mise au point des programmes.» (1996, p. 14)

Tout en ayant trouvé dans le langage fonctionnel et dans le logiciel SGDL une approche qui convenait à la description des processus et en ayant découvert avec l'apport du concept d'abstraction,² présent dans le langage *Scheme*, une approche qui

¹ «Un point important de cette famille de langages est que l'on peut effectuer des calculs aussi bien sur les valeurs que sur les fonctions, à l'aide d'une formulation homogène. Cette notation, qui est inexistante dans les mathématiques «classiques», est apparue pour la première fois avec le lambda-calcul d'Alonzo Church (1941), dont nous allons ci-après présenter brièvement le principe.

Considérons, en effet la notation :

$$\pi = 3.1415926535897932385$$

qui identifie, à une erreur d'approximation près, au nombre réel 3.1415926535897932385 la constante connue sous le nom de π . À présent, notons f la fonction qui élève un nombre réel au carré. L'écriture «traditionnelle» de la définition de cette fonction est :

$$f : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$$

$$x \rightarrow x^2$$

Remarquons au passage que le « x » de la formulation joue un rôle *muet*, et que la fonction f aurait très bien pu être définie en utilisant un autre symbole que x :

$$f : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$$

$$y \rightarrow y^2$$

Les mathématiques «classiques» ne nous fournissent aucun moyen de donner la définition de f sous la forme :

$$f = \dots$$

comme nous ne l'avons pas pu pour la constante π .

Dans ce but, Alonzo Church a proposé la notation :

$$f = \lambda x . x^2$$

qui consiste à indiquer le nom d'un *argument quelconque* de la fonction f derrière la lettre grecque « λ », l'image par f de cet argument étant l'expression qui suit le point situé après le nom de cet argument quelconque. Bien sûr :

$$\lambda x . x^2 = \lambda y . y^2$$

C'est-à-dire qu'un nom introduit derrière le symbole lambda n'a de *sens qu'à l'intérieur de l'expression qui définit la fonction*. (Hufflen, 1996, pp. 14-15)

² Ce concept permet de séparer l'organisation des données et leur utilisation dans un calcul complexe et d'adopter une méthode de programmation. Cette méthode consiste à distinguer abstraction et représentation. Selon Hufflen, cette méthode permet : «d'une part de définir précisément les effets des variables et des fonctions de représentation de cette structure de données, ces variables et fonctions étant : les constructeurs [...] les discriminants ou fonctions de test... les sélecteurs, c'est-à-dire les fonctions d'accès [...] ; d'autre part, s'astreindre, dans l'écriture des autres fonctions utilisant cette nouvelle structure de données, à ignorer les particularités de la représentation et à ne manipuler les valeurs appartenant à cette structure qu'au moyen des fonctions de représentation précédentes.

nous permettait en tant qu'architectes de nous sentir à l'aise lors de la description du processus de construction de l'objet, je ne retrouvais pas cette aisance que l'esquisse procure et à laquelle nous avons été habitués pendant des années de pratique et d'enseignement. (Figure 86 et 87)

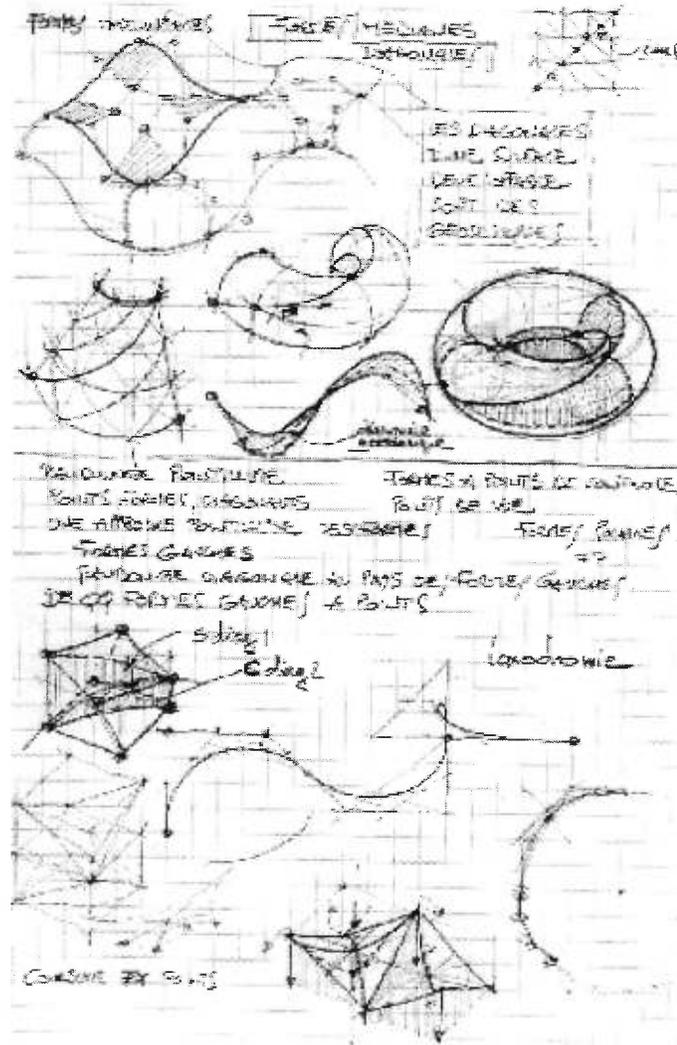


Figure 86. Carnet d'esquisses sur les Formes Pascaliennes (A. Marty, 1999)

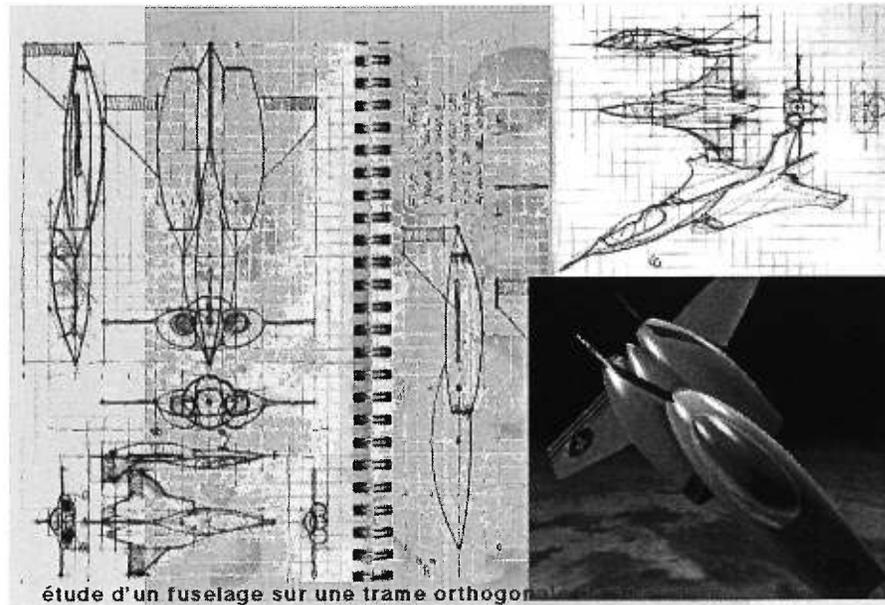


Figure 87. Carnet d'esquisses sur les Formes Pascaliennes (A. Marty, 1999)

Par un projet de recherche sur *La simulation informatique et création industrielle*, que j'avais entrepris au début des années 90 avec les collègues de l'École d'Architecture du Languedoc-Roussillon en France j'avais pu me familiariser avec les recherches sur la modélisation menées par A. Marty. Ces recherches sur les formes avec une approche de type paramétrique peuvent être à première vue en dualité avec celles de type « implicite » développées par Rotgé, pourtant elles font partie d'une polarité qui, loin de créer des débats d'écoles de pensée, soulignent la complexité du processus de communication pendant la conception.

Dans ce processus, selon M. Conan, il y a trois aspects du « maillon élémentaire d'exploration à l'œuvre dans la conception architecturale. Ce sont :

- la formulation du point de vue initial qui repose sur l'articulation d'un schéma figural et d'une intention qui pourrait être verbalisée ;
- la construction par l'architecte à partir d'une culture formelle personnelle de propositions successives d'esquisses destinées à faire progresser l'exploration des possibles ;
- la présentation des propositions qui sont issues de cette pré-élaboration à l'épreuve de formes de la pensée critique dont les sources sont pour une large part empruntées aux destinataires, aux producteurs du bâtiment, aux esthètes et aux utilisateurs du futur bâtiment.

Ces trois caractéristiques font ressortir le rôle de maïeuticien que remplit l'architecte» (1990, chap.VI).

En effet, le concepteur est constamment à la recherche d'outils pour communiquer, pour transmettre à ses interlocuteurs sa pensée, avec un langage parfois implicite et parfois explicite.

Il n'y a pas de congrès sur la CAO, ces dernières années, qui ne dédie un volet de ses communications à ce que les Anglais appellent le *sketching in conceptual design* et aux possibilités de codifier les actions pendant cette première phase de conception. La revue *Design Studies* a dédié, en 1998, un numéro spécial à ce problème. Dans ce numéro, plusieurs auteurs, M. Suwa, A.T. Purcell, J.-S. Gero et G. Goldschmidt, soulignent l'importance d'explorer cette phase de la conception, parce que c'est celle qui amènera fort probablement les grands changements dans l'adoption de l'outil informatique en architecture, et comme nous l'avons déjà souligné dans cette thèse, amènera un changement de paradigme dans l'utilisation des outils de communication. Selon E.S. Fergusson (1992) qui a observé les travaux des concepteurs «*to capture fleeting ideas on paper*», on peut identifier trois types de *sketch* :

- le *thinking sketch*, pour visualiser des pensées ;
- le *prescriptive sketch*, pour permettre aux dessinateurs de faire les dessins d'exécution ;
- le *talking sketch*, pour permettre de clarifier tout au long du processus la complexité de l'objet. Cette phase est aussi liée à des explications verbales.

McGown et all. soulignent aussi que le sketch est fait pour une de ces trois raisons :

- pour communiquer la nature «physique» d'une entité conçue et inventée ;
- pour rappeler et visualiser la nature «physique» d'une entité ou d'un environnement ;
- pour esquisser rapidement la représentation visuelle d'entités ou d'environnements.

Finalement, l'importance du sketch est d'être un outil de communication rapide pour saisir la réelle fonction de l'objet, communication à laquelle recourt l'architecte tout au long du processus de conception. Ce constat est très important parce qu'il permet de montrer l'importance d'intervenir avec les outils informatiques dès la première phase du processus de conception. Si nous n'introduisons pas, dès le départ, les opérateurs

sémantiques que nous avons identifiés dans la recherche sur les méthodes de travail de l'architecte, le «caractère sensible» de l'architecture ne pourra pas être intégré lors de la modélisation géométrique des objets.

À ce propos, M. Suwa et le groupe du *Key Center of Design Computing*, affirment que le sketch doit servir non seulement comme une mémoire externe ou comme un fournisseur de *visual cues* à associer à l'information non visible, mais aussi comme un ensemble de paramètres avec lequel le design est pensé et construit. (1998) Ils soulignent aussi l'importance de prendre en considération les actions induites non seulement par l'information visuelle, mais aussi non-visuelle. Ces actions sont regroupées sous quatre catégories : physiques, perceptives, fonctionnelles et conceptuelles (Figure 88) qui correspondent aux différents niveaux de traitement de l'information et peuvent être modélisables pour contribuer à former ce que M. Suwa appelle la *key of design idea*.

Table 1 Action categories

Category	Names	Description	Examples
Physical	D-action	Make depictions	Lines, circles, arrows, words
	L-action	Look at previous depictions	-
	M-action	Other physical actions	Move a pen, move elements, gesture
Perceptual	P-action	Attend to visual features of elements	Shapes, sizes, textures
		Attend to spatial relations among elements	Proximity, alignment, intersection
		Organise or compare elements	Grouping, similarity, contrast
Functional	F-action	Explore the issues of interactions between artefacts and people/nature	Functions, circulation of people, views, lighting conditions
		Consider psychological reactions of people	Fascination, motivation, cheerfulness
Conceptual	E-action	Make preferential and aesthetic evaluations	Like-dislike, good-bad, beautiful-ugly
	G-action	Set up goals	-
	K-action	Retrieve knowledge	-

Figure 88. Identification des actions modélisables (M. Suwa, 1998)

Partageant les mêmes préoccupations, G. Goldsmith conclut, après une recherche expérimentale sur le comportement des concepteurs en phase de design, que le problème des programmes de CAO se trouve dans leur difficulté à supporter le processus d'assemblage et de restructuration proposé pendant l'esquisse. (Figure 89)

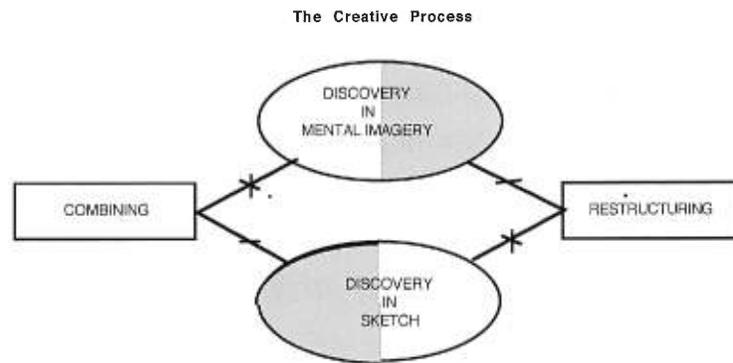


Figure 89. Identification des actions modélisables (M. Suwa, 1998)

Mais il faut souligner que nonobstant l'emphase mise sur le rôle de l'analogie pendant le processus de design, tous les inventeurs n'ont pas trouvé leur solution par l'analogie, et l'auteur cite à ce propos Henry Poincaré comme exception:

«Henry Poincaré was entering a bus which was to take him on a geological trip, when suddenly he saw a fundamental property, uniting a hitherto unrelated group of mathematical functions. These, and several other reports of scientific discoveries are frequently reported.» (Verstijnen et Goldschmidt, 1998, p. 519)

Ce qui me permet d'affirmer que sans une image analogique, une restructuration des connaissances peut aussi prendre place.

Ces recherches démontrent l'importance de trouver une voie pour créer un lien, qui est peut-être aujourd'hui encore mathématiquement impossible, entre ce qu'on peut appeler la modélisation de l'esquisse et les outils déjà bien rodés de la modélisation volumique, par une approche qui n'étant pas analogique, pourrait chercher des liens dialectiques qui puissent transférer la connaissance des «discours» de type paramétrique à des «discours» de type implicite.

En s'interrogeant sur la même problématique, A. Marty nous dit que «Si le langage privilégié de l'ingénieur est le calcul numérique, celui de l'architecte est la géométrie descriptive. La question est de savoir si l'ordinateur peut parler directement le langage de l'architecte?». (1999, p. 5) Il présente une étude qui constitue une tentative pour dégager une définition unitaire purement géométrique des formes de la CAO et de l'infographie, ceci à des fins essentiellement pédagogiques pour leur utilisation dans une école d'architecture. Et pour soutenir cette recherche l'auteur souligne que :

«En CAO et en infographie, il est courant de présenter des façons très diverses des objets géométriques comme : le point, les segments, les polygones, les polyèdres, les diverses courbes et surfaces à pôles (béziers, splines, rationnelles ou non), les coniques et les quadriques, les surfaces de coons, de gordon, les tubages et les surfaces produites par des transformations affines en général, les surfaces quasi-minimales satisfaisant à l'équation de Laplace, certaines classes de volumes et d'hypervolumes (générant des feuilletages, des faisceaux de fibres, des tubages modulés, des représentations de fluides ou de champs élastiques,...)» (1999, p. 5)

Parmi les conclusions de notre rapport final sur *La simulation informatique et création industrielle* (1996), je soulignais le besoin de développer des outils de communication utilisant l'informatique qui puissent être caractérisés par une qualité du processus de conception du programme informatique favorisant la qualité des données à traiter plutôt que la quantité et par une compréhension de la programmation sous-jacente, pour maîtriser le traitement des algorithmes qui sont apparus depuis quelques années et qui permettent des nouvelles descriptions de la forme.

Depuis, les recherches de A. Marty ont amené une nouvelle compréhension de la géométrie descriptive qui peut permettre d'en faciliter la manipulation, mais surtout de créer des conditions pour découvrir de nouvelles formes. C'est cet aspect qui doit être pris en ligne de compte, parce qu'il rejoint la problématique des blocages dans l'adoption de l'outil informatique et qu'il propose un lien entre l'esquisse et le modèle volumique. Dans cette optique, A. Marty a développé un outil qui «montre comment (un élément de) ces divers objets géométriques peut être construit à partir d'un seul élément, appelé forme pascalienne, et d'un ensemble réduit d'opérateurs, et comment on est conduit à une approche unitaire, systématique et simple de ses propriétés (continuité, repères tangents, courbures,...) tant au niveau géométrique, qu'au niveau algébrique ou au niveau informatique». (Marty, 1999, p. 5)

L'approche géométrique est basée sur l'utilisation exclusive d'un seul outil, une simple corde que l'on tend entre deux points et que l'on replie sur elle-même pour marquer le milieu ; on se souvient de la règle et du compas, outils fétiches des géomètres grecs... et des architectes.

L'approche algébrique, complémentaire, utilise le seul concept d'interpolation linéaire pour retrouver les équations paramétriques des formes et établir un pont entre l'approche géométrique et les présentations classiques trouvées dans la littérature traitant ce sujet.

L'approche informatique se base sur une classe unique dont les algorithmes privilégient l'approche géométrique basée sur l'application récursive d'un opérateur milieu, au détriment d'une approche algébrique basée sur le calcul d'expressions polynomiales. Cette approche permet de découvrir dans un langage connu, un prolongement naturel de la géométrie élémentaire des droites, plans et coniques vers celle des courbes et des surfaces plus complexes que l'architecte est appelé à manipuler sur l'ordinateur «... Et de découvrir qu'il peut les dessiner également SANS l'ordinateur, avec une corde et des piquets sur le sable de la plage...». (Marty, 1999, p. 5)

Ce langage du «visible», basé sur l'utilisation des formes pascaliennes comme outil de conception, manipule un nombre important de formes géométriques :

«la plupart des courbes et des surfaces utilisées en CAO et en infographie peuvent être décrites à partir de telles formes soit directement, soit indirectement par le biais d'opérateurs de concaténation, de produit, de projection ou de transformation affine.

On peut imaginer quelques utilisations de cette approche des formes :

- en informatique, pour concevoir un modéleur 3D unitaire, évacuant la multitude de boutons habituelle, et conduisant au concept d'une sorte de tableur de la 3D, dans lequel les cellules pourraient recevoir soit des formes, soit des relations entre formes produisant d'autres formes ;
- en algèbre, pour imaginer des ensembles structurés par des lois de composition entre éléments, l'essentiel étant le caractère interne des opérateurs : le produit d'une forme par une forme est une forme ;
- en géométrie, pour proposer au réfractaire total à l'algèbre et aux équations une méthode simple de dessin à main levée de formes courbes complexes, comme la carrosserie d'une voiture, la coque d'un bateau, ou les hanches de la Danaïde créée par le sculpteur Rodin en 1885.» (A. Marty, 1999, p. 45)

Il est important de souligner, que dans le cas du langage SGDL et FP la formalisation par un seul élément permet le passage continu d'une forme à l'autre, selon un raisonnement, sans avoir à prédire la solution avant son élaboration. Ce qui est fondamental pour le raisonnement pendant la conception.

9.5.3 Un exemple de langage «causal-probabiliste»

Selon E. Morin, «La conception utilise toutes les ressources de l'esprit, du cerveau et de la main de l'homme : elle combine l'aptitude à former des images mentales avec les aptitudes à produire des images matérielles (dessins, plans d'architectes, maquettes d'ingénieur, modèles réduits)». (Morin, Tome III, 1981) De la même façon l'architecte, lors de l'utilisation et de l'exploration d'un langage artificiel, comme le langage graphique en architecture ou le langage fonctionnel en informatique, ne doit pas se conformer à une méthode. Comme le souligne P. Vidal, les contours qui définissent un modèle mental ne sont pas des frontières infranchissables mais des construits cognitifs perméables, évolutifs et dynamiques. (1997) Le processus de conception s'appuie alors sur une dialectique entre modèle mental et modèle exprimé : «le modèle mental permet la compréhension, la formulation d'hypothèses ; la perception du modèle exprimé permet la validation, l'invalidation de ces hypothèses. Les deux modèles vont ainsi se construire (s'affiner, évoluer) progressivement et simultanément.» (F. Adreit et all., 1998, p. 74)

C'est dans cette optique que, «intrigué» par les écrits sur la modélisation déclarative, j'ai entrepris des recherches avec L. Popova et V. Popov du département d'informatique de l'université de Poitiers. Le but était de voir comment la conception est perçue par les informaticiens, et comment il est possible de réduire l'écart entre le modèle mental et le modèle exprimé. F. Adreit souligne que les modèles mentaux peuvent être matérialisés sous forme de «modèles exprimés» qui est une expression du modèle mental, se pliant à des lois physiques ou encore au formalisme du langage artificiel utilisé :

«De la même façon, un modèle mental se plie à des contraintes cognitives constituées par le paradigme culturel de référence et par les finalités de son concepteur. Ces contraintes cognitives amènent le concepteur à "éclairer" le phénomène étudié d'un certain "regard". H. A Simon compare cet "éclairage cognitif" à celui d'un projecteur éclairant une

partie de l'espace et laissant le reste dans l'ombre, distinguant ainsi l'environnement (dans l'ombre) et le phénomène modélisé (dans la lumière).» (F. Adreit et all, 1998, p. 76)

La modélisation déclarative se prête bien à ce type d'approche. Les systèmes de CAO ont besoin de manipuler des informations de nature qualitative. Par exemple : «les fondations de la maison doivent être posées avant les murs». (L. Popova, 1999, p. 1) Toujours selon L. Popova, les informations spatiales de type non numérique sont souvent décrites en termes de relations entre objets, «une relation de type algèbre formelle est donc naturelle». Par elle, on détermine le type d'objet que l'on dira spatial pour représenter ces données et des relations pour représenter les informations les concernant.

Mon travail a porté sur les possibilités de trouver une voie d'exploration dans la modélisation spatiale hybride par la conception déclarative des scènes et sur la possibilité de gouverner des opérateurs sémantiques. Et les travaux de L. Popova et de V. Popov ont porté sur la formalisation d'un langage à objets pour la conception déclarative des scènes à utiliser lors de cette investigation. Ces recherches ont amenés à proposer, comme solution, un prototype de «noyau» ou moteur à l'aide d'un langage à objets SOML (*Scenes Objects Modeling Language*) destiné à la conception déclarative de scènes par la synthèse d'images.

Ce langage tente de fournir au concepteur des outils de création rapide de prototypes de scènes 3D et il peut servir aussi comme moyen d'acquisition et de représentation de connaissances, de communication et d'échange de données avec d'autres outils dans un environnement de conception.

Les avantages offerts par la mise en œuvre de SOML sont :

- du point de vue de l'utilisateur : la possibilité de description déclarative du concept initial associé à la scène en termes de vocabulaire de propriétés et contraintes, la possibilité de raisonner de manière qualitative et quantitative sur ces propriétés, la modification de solutions intermédiaires à différents niveaux de détail, la réutilisation de solutions anciennes ;
- du point de vue de la mise en œuvre: la structuration des propriétés et des méthodes sous forme de connaissances du domaine, la génération de solutions optimales selon des critères heuristiques causal-probabilistes, la transformation de la description des concepts sémantiques de scènes en code générique d'entrée d'un modèleur géométrique CSG (*Constructive Solid Geometry*) et du logiciel de visualisation, l'intégration des fonctionnalités de génération et de modification de paramètres, la compilation d'une scène à partir de composants d'autres scènes finales et d'opérations de transformations géométriques de groupes de scènes.

Pour ne pas disperser les résultats de ces travaux et pour garder l'intégralité et la compréhension du langage SOML, je présente en annexe les caractéristiques essentielles du noyau SOML dans l'article qui a été publié lors du dernier Congrès d'ACADIA en 1998. On pourra y trouver la conceptualisation informatique de V. Popov, ainsi que des observations sur la nature, les qualités et les limites de la conception déclarative des scènes. Résultats qui pourraient intéresser davantage un informaticien qu'un architecte, mais qui permettent de saisir l'importance d'une approche coopérative dans la formulation des langages et des discours que l'ordinateur doit par la suite traiter.

Cette démarche de travail coopératif s'insère dans une approche méthodologique qui rejoint les propos de E. Morin dans son tome 1 de *La méthode*, «expériences se transformant en savoir, connaissances s'expérimentant en se transformant, sans être dès l'abord inhibées par nos clivages disciplinaires ou professionnels, mode de connaître et de penser qui [...] sera nécessairement un nouveau mode d'agir». (1981, T.1, p. 387)

C'est, comme le souligne J.-L. Le Moigne dans sa présentation de la rencontre MCX99 dont le thème était *Pragmatique et complexité*, une proposition pour nous «attacher, pragmatiquement, à décrire pour comprendre dans l'action (à "modéliser la

complexité" disons-nous volontiers), plutôt qu'à prescrire l'action sans comprendre (à "manager ou à contrôler la complexité", disent-ils volontiers)». (1999, p. 1)

Ces dernières années, la notion de conception a été exploitée dans différents domaines d'activités de l'homme. C'est un concept associé à l'ensemble des activités créatives dans la société (Trousse, 1989). Les méthodologies créées à sa base ont subi une grande évolution dans le domaine de fabrication de produits mécaniques, électroniques et dans le domaine de l'architecture. En termes généraux, la conception est un processus d'enchaînement cyclique d'étapes de composition de structures complexes à partir de composants complètement spécifiés et la décomposition de structures, dont les informations manquent de précision. La durée d'un processus de conception est habituellement limitée par l'aboutissement d'états de stabilité des solutions obtenues.

En synthèse d'images, les objets à concevoir sont les composants de la structure de la scène, des méthodes de construction et de représentation dans l'espace 3D et de ses attributs. Un objet est caractérisé par une forme géométrique de complexité quelconque munie de caractéristiques d'apparence physique qui peut être représentée de manière réaliste sur l'écran de l'ordinateur sous forme d'une image graphique. En termes de représentation informatique, la conception en synthèse d'images comprend des modèles géométriques, modèles photométriques, modèles cognitifs et leurs explorations pour la construction et l'explicitation des classes de solutions.

Du point de vue cognitif, les scènes représentent un moyen de coder l'information complexe, de la percevoir et de raisonner sur ses aspects inconnus faisant partie de nombreux problèmes sous-jacents. Avec le besoin de plus en plus nécessaire de tels modèles performants, on constate durant leur création et leur exploration, l'existence d'un problème majeur. Il s'avère difficile de maîtriser l'aspect géométrique, fonctionnel, technologique, etc. de scènes complexes 3D à toutes les étapes du cycle de leurs vies. Tout ceci a provoqué la naissance d'outils CAO d'aide à la conception.

Le marché actuel de la CAO est dominé par des systèmes destinés aux applications spécifiques, n'ayant qu'un accès limité aux bases de données. (Kehrer et Vatterrott, 1996) Dans ces systèmes d'aide à la conception, les objets à concevoir ne sont explicités que dans le cas où la connaissance de tous leurs paramètres est complète.

Ce fait présente une limitation pour le concepteur car il n'a pas de possibilité d'explicitier des solutions partielles. Souvent, dans le cas de problèmes sur-contraintes, il est utile de pouvoir contrôler la relaxation des contraintes dans les solutions intermédiaires. Ces systèmes sont articulés essentiellement autour de l'aspect géométrique, manquant de sémantique de haut niveau et sur l'adaptation à la pensée du concepteur. Comme le souligne P. Charman (1995), la géométrie n'est qu'un artifice de manipulation d'un univers dont la sémantique est complexe.

Les travaux dédiés à la conception déclarative de scènes (Miaoulis et Plemenos, 1996 ; Colin et al., 1997) marquent un pas vers l'amélioration des outils d'aide à la création d'objets. La conception de scènes par l'approche déclarative consiste à offrir des moyens pour exprimer en termes de langage les besoins de chaque étape du cycle de l'évolution du processus de conception.

La création d'une scène finale nécessite de nombreux essais répétitifs de décomposition des solutions trouvées (scènes intermédiaires) en éléments à raffiner en accord avec les exigences des buts et des nouvelles reconstitutions de la scène. C'est un processus de manipulation de propriétés riches sémantiquement, jamais connues auparavant, dans la boucle description - génération - prise de connaissances (Lucas et al, 1990), ce qui signifie une tâche de conception déclarative.

En raison du nombre de problèmes à traiter dans cette approche, il faut souligner :

- la difficulté de gestion optimale du nombre des solutions cohérentes avec les contraintes imposées ;
- la difficulté de réutilisation de l'expérience d'autres concepteurs et le besoin d'un langage convivial de description et de contrôle proche de la pensée de l'utilisateur et couvrant toutes les étapes du processus de conception.

Ces systèmes représentent une voie nouvelle pour aborder le problème d'assistance réduite en CAO, en intégrant aux modèles géométriques des connaissances de conception. (Kehreret Vaterrott, 1996 ; Vargas, 1995 ; Trousse, 1989) La modélisation et l'exploitation de ces connaissances est possible grâce aux couplages des systèmes CAO avec d'autres outils informatiques avancés parmi lesquels on distingue les modeleurs traditionnels basés sur les langages orientés objets, des moteurs

d'inférence, des systèmes de résolution de contraintes, des méthodes de raisonnement qualitatif et quantitatif.

Malgré le progrès évident des systèmes d'aide à la conception, on constate leurs limites, que Kehrer et Vatterrott (1996) résumant ainsi :

- l'ouverture insuffisante d'évolution ;
- le manque de possibilités de configuration ;
- le peu de capacité d'intégration ;
- le manque de possibilités d'échange opérationnel entre les systèmes ;
- le manque de capacités de conception coopérative ;
- l'existence d'obstacles à la migration des domaines d'application ;
- l'absence de modularité ;
- le manque d'interfaces de type utilisateur suffisamment conviviales.

L'intérêt d'une proposition vers un langage à objets pour la conception déclarative de scènes porte sur la proposition d'un support méthodologique pour la création d'un «noyau» avec un langage intégrant des outils d'aide à la conception de scènes synthétiques *SOML (Scene Objects Modeling Language)* basé sur le principe «déclaratif». L'objectif du langage est de proposer des fonctionnalités permettant au concepteur d'effectuer des activités prévues par le Modèle du Processus de Conception de Scènes (MPCS) aux différentes étapes. Dans le cas de scènes synthétiques, le MPCS se réfère aux modèles conceptuels et logiques des composants de la scène et répond à la question «comment concevoir la scène?». Il permet d'aborder la conception sous un nouvel angle, comme un problème de résolution à base de connaissances hybrides.

Cette proposition d'un langage pour la conception déclarative de scènes tente d'apporter une contribution aux exigences actuelles des applications CAO : flexibilité, facilité d'utilisation, possibilité d'intégration d'autres outils et fonctionnalités. La partie qui suit présente le cadre de travail. En annexes, dans l'article *Toward an Object-Oriented Language for the Declarative Design of Scenes* nous exposons les caractéristiques essentielles du noyau SOML.

Le langage en général, grâce à son pouvoir d'expression, est le meilleur moyen existant que l'homme a pour décrire, modéliser et exploiter le monde. La technologie informatique actuelle a fourni une panoplie de langages diversifiés selon les différents

besoins et techniques de fonctionnement : impératifs, fonctionnels, logiques et dernièrement, par objets. (Oussalah, 1997) Dans notre étude, nous nous sommes particulièrement intéressés à la mise en œuvre de langages qui puissent avoir comme objectif la conception de scènes, c'est-à-dire, l'ensemble des activités de description de la scène et l'acquisition de connaissances, la génération de solutions paramétrées et leurs instances, la prise de connaissance par visualisation, la modification en cas de besoin et la communication avec l'environnement.

Jusqu'à présent la plupart des langages présentent l'inconvénient de ne pouvoir dégager la sémantique des concepts concrets présentés par les modèles des scènes. Ils restent loin de la pensée du concepteur et des schémas linguistiques compris par le langage naturel. Ils ne permettent pas une structuration aisée des connaissances du domaine, ni l'intervention du concepteur dans le cycle d'évolution de la conception.

Dans le domaine de la conception de produits, nous trouvons des langages mieux adaptés aux besoins particuliers. Par exemple, dans la conception en génie mécanique nous avons des langages comme «*Maily*» (Trousse, 1989), «*DDL*» (Vargas, 1995), «*EREP*» (Chen, 1995) et bien d'autres. Il existe également un ensemble de langages conçus pour modéliser les activités d'un système informatique en général, indépendamment du domaine, regroupés selon les méthodes de leurs applications. Les plus connus sont Common KADS, Merise, Graffcet etc. (Vargas, 1995) Ils présentent tous la contrainte de ne pas être utilisables directement dans un domaine particulier.

En termes de représentation et d'utilisation de connaissances au sein d'un système d'aide à la conception de scènes (Trousse, 1989), le paradigme orienté objets permet la structuration, sous forme de classes d'objets, des connaissances statiques (champs d'attributs, de propriétés) et des connaissances dynamiques (méthodes). Dans ce contexte, une classe détermine un modèle générique qui permet «l'instanciation» d'objets similaires. Les aspects cognitifs des systèmes d'aide à la conception sont partiellement couverts par les langages de modélisation des connaissances basés sur la notion de règle de production, réseaux sémantiques et *frames* (SHIRKA, KRL, KI-ONE).

En synthèse d'images, se développent des langages interprétés par des «scripts» utilisés pour la modélisation et l'animation de scènes comme «*Put*» (Clay et Williams, 1996), «*Smile*» (Argues et Auber, 1994), «*Sphigs*» (Foley, 1995), «*Mira*» (Thalman,

1988), «*Fabule*» (Gascuel, 1996), et des langages donnant priorité à la visualisation comme «*Pov-ray*» (Dif, 1996), «*MSDL*» (Gatenby et al, 1993), «*RayShade*», «*Radiance*», «*RenderMan*». Ils ont été conçus afin de répondre aux besoins d'outils, surtout dans les laboratoires de recherche, d'infographie et de CAO en mécanique. Dans tous ces cas, ils ont aussi été créés avec des formats de données graphiques particulières (plus de 40 types différents). Ces langages sont de type procédural, utilisant comme arguments les paramètres des objets - primitives géométriques. La portée de ces langages se limite à certaines étapes seulement du cycle d'évolution des objets en conception. Dans le cas de scènes complexes, le contrôle sur les paramètres de la conception, en termes de structuration et de réutilisation du code, devient difficile. Dans le cas de couplage de systèmes de résolution à base de connaissances, il est nécessaire que le langage de conception permette un support global à tous les niveaux de la conception.

En l'annexe, V. Popov montre des détails du langage spécialisé pour la conception de scènes 3D avec des fonctionnalités permettant au concepteur de créer des primitives de solides CSG constituant une scène synthétique, de représenter les méthodes de son assemblage et sa modification en termes de connaissances méthodologiques et de résolution causale-probabiliste, et d'interagir avec l'environnement ou d'autres scènes. La résolution causale-probabiliste permet d'introduire des concepts reflétant la nature non déterministe de l'interprétation des sémantiques possibles associées aux propriétés couvrant le concept d'une scène cible. (Peng et Reggia, 1990)

La création d'un logiciel d'aide à la conception de scènes est une tâche difficile en regard à la complexité des problèmes sous-jacents. En effet, les exigences quant aux fonctionnalités font du logiciel SOML un système informatique regroupant plusieurs objets et méthodes de traitement. Les avantages potentiels provenant de l'utilisation du langage résident dans ses fonctionnalités permettant une assistance à toutes les étapes du processus de conception de scènes complexes.

Outre les résultats initiaux encourageants, il reste encore à améliorer le niveau d'application des techniques cognitives de représentation et d'exploitation des connaissances, le perfectionnement des vocabulaires (création d'une base de connaissances terminologiques - BCT qui va faciliter l'utilisation du langage SOML pour différents types d'application envisagés), des schémas linguistiques, et la convivialité de l'environnement de travail.

À ce propos, j'ai déjà souligné que le langage SOML permet de créer des modèles de scènes (géométriques, configurations topologiques, d'aspect réaliste, de méthodes de construction etc.), qui peuvent être postérieurement modifiées dans les étapes successives de l'évolution de la conception. Or, la tâche la plus importante du concepteur est justement de travailler, au départ, avec des objectifs souvent flous et ambigus, définis par le client ou par les spécialistes d'autres domaines.

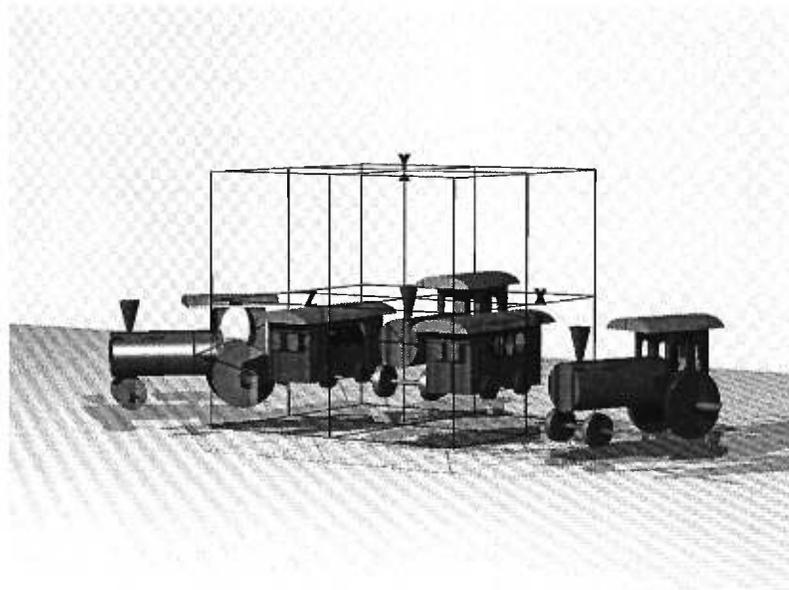


Figure 90. Image de la scène finale "train" obtenue par une séquence d'activités exécutées selon un scénario de conception (V. Popov, 1998)

Nous pouvons entrevoir, en analysant la tâche du concepteur, une utilisation du langage SOML comme outil d'aide à la conception en architecture. En effet, au début de l'idée architecturale, pour communiquer avec un client, l'architecte utilise le croquis et l'esquisse qui expriment un rapport entre un concept et la réalité des choses.

C'est par ce croquis qui évolue que nous pouvons dire qu'un langage, qui tient compte de la description déclarative du concept initial et de la possibilité de raisonner d'une façon qualitative et quantitative sur les propriétés du modèle, s'apparente au processus de conception en architecture. Nous voyons dans ce langage un outil basé non seulement sur la production des images synthétiques réalistes de scènes 3D (dessins),

mais aussi sur leur formation. Selon cette démarche, la forme n'est pas la résultante d'une analyse-solution, ni d'une simple liste de fonctions, mais elle est le résultat d'une activité cybernétique. Les fonctions (activités) sont considérées comme un procédé de vérification de l'idée architecturale, la préfiguration mentale d'un problème à travers la représentation évolutive de la forme. (Portoghesi, 1981).

L'adoption de l'ordinateur par les concepteurs pousse la recherche vers des systèmes manipulant des connaissances sur les composantes de la scène et aussi sur le processus de conception lui-même. Ceci facilite les étapes d'analyse, de synthèse et d'évaluation du design dès le début de la phase de conception. Ces nouveaux systèmes se distinguent par le type de raisonnement basé sur des inférences (déductions, abductions, ou CSP) et l'utilisation d'une approche symbolique plutôt que d'un calcul numérique. Ce qui contribue à rendre le processus de design explicite et plus transparent. Plusieurs autres recherches se sont déjà orientées dans cette direction, notamment celles du GEODE et du GRCAO, qui proposent l'utilisation des méthodes de modélisation basées sur la description déclarative du processus de construction dans un cas et la traduction informatique de ce processus dans l'autre, ce qui permet de rendre le modèle totalement paramétrable. (*SGDLsoft*, 1995) Nous pouvons ainsi produire des simulations et une interaction entre l'œil de l'architecte et la forme de l'objet. Ces démarches trouvent leur complémentarité avec celle du SOML pour la conception déclarative des scènes.

La connaissance et la maîtrise de ces outils pourront apporter à l'architecte un nouvel éclairage sur les problèmes de la conception architecturale, l'aider à améliorer les méthodes classiques et accélérer la mise au point de méthodes nouvelles dans l'élaboration du projet architectural. Par le biais de l'informatique, l'architecture pourra évoluer vers un projet qui consiste à établir un pont entre les méthodes architecturales classiques et les nouvelles. (De Paoli et Marty, 1996 ; Miaoulis et Plemenos, 1996)

Pour conclure ce survol sur un langage à objets pour la conception déclarative de scènes, il faut rappeler qu'un langage est défini en linguistique comme un ensemble infini de phrases grammaticales dans une langue donnée, construites par concaténation au moyen d'un ensemble fini de règles, à partir d'un ensemble fini d'éléments minimaux et où le discours est le langage mis en action. Pour mettre un langage informatique en action, il faut nécessairement qu'il soit «intelligent», ce qui signifie qu'il faut qu'il intègre des connaissances de conception au modèle géométrique.

L. Popova (1999) souligne que, malgré le progrès évident des systèmes d'aide à la conception, on constate ses limites. Tout particulièrement dans le manque de possibilités d'échange opérationnel entre les systèmes, le manque de capacité de conception coopérative et la présence d'obstacles à la migration des domaines d'application, l'absence de modularité, le manque d'interfaces utilisateurs suffisamment conviviales. Finalement un grand pas reste à franchir afin de passer des outils de CAO géométriques à des systèmes d'aide à la conception intelligents manipulant non plus des objets et des contraintes géométriques, mais plutôt des propriétés conceptuelles.

Par ailleurs, les expériences que nous avons menées avec le langage SGDL développé à la faculté de l'aménagement de Montréal et le langage SOML développé au département d'informatique de l'Université de Poitiers, ainsi que les travaux de A. Marty sur les Formes Pascaliennes, nous permettent d'affirmer que l'importance des différents langages dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on peut citer : la spécificité des logiciels, le degré d'automatisation des actions et le niveau d'intégration des fonctions. Mentionnons enfin que la diversité des méthodes auxquelles on fait référence, non seulement dans cette recherche, mais dans la littérature actuelle, rend difficile une étude exhaustive dans ce domaine. Mais il est tout de même possible de faire ressortir que le modèle théorique devra tenir compte des méthodes d'intégration des fonctions traitées par les différents langages.

Ce modèle théorique s'appuie sur la façon de traiter la formulation et la résolution des problèmes de conception, c'est-à-dire la recherche du concepteur pour définir un objet ayant une ou des fonctionnalités particulières qui sont liées à un certain nombre de spécifications et le tout sans disposer d'aucune procédure directement applicable pour atteindre ce but. La complexité de cette approche et le caractère «pernicieux», «mal défini», «mal structuré» des problèmes à résoudre, ont été déjà abordés en parlant du concepteur qui dispose au départ d'une représentation mentale incomplète et imprécise du problème et que ce n'est que progressivement, en cours même de résolution de ce problème, que le concepteur complète et précise sa représentation mentale en choisissant certaines option de conception.

De ce fait, comme le souligne H. Simon (1995), on ne peut pas dissocier la phase de construction de la représentation du problème (*problem-framing*) de celle de résolution du problème (*problem solving*). Chaque concepteur se construit ainsi sa propre représentation du problème et traite en fait un problème qui lui est spécifique. En

effet les problèmes de conception traités par plusieurs concepteurs créent des représentations mentales différentes qui donneront des solutions acceptables, mais différentes.

Selon L. Popova (1999), la créativité qui se manifeste dans l'élaboration d'un objet nouveau dépend de la représentation mentale que se construit le concepteur, ou plus précisément des différentes images mentales qu'il va évoquer au cours des étapes de *problem framing* et de *problem solving*. Les images mentales en question sont celles d'objets plus ou moins familiers pour le concepteur et dont il va s'inspirer pour à la fois comprendre le problème de conception et le résoudre.

Ce qui introduit une autre caractéristique du langage à adopter qui est son approche dynamique, permettant la construction progressive de la représentation de l'objet à concevoir et par le fait même, la résolution momentanée du problème. Permettant aussi de rechercher des solutions avec des langages qui, par une démarche naturelle, utilisent la double approche de «résolution de problèmes» et de l'«apprentissage».

Ce modèle présente une différence très importante par rapport au modèle mécaniste employé par la physique galiléenne. R. Boudon, dans son essai sur la signification de la notion de structure, nous rappelle que l'approche épistémologique qui avait caractérisé le modèle de Galilée, selon laquelle «les explications téléologiques devaient être rejetées du côté de la métaphysique, pour ne conserver du côté de la science que les explications mécanistes», a amené à exclure du traitement scientifique un grand nombre d'objets. (1968, p. 30) Ainsi, certains actes des concepteurs, comme l'apprentissage, ne pouvant pas être compris et donc expliqués, n'ont pas été pris en considération. Ce qui signifie aussi que, comme pour la linguistique, on ne peut pas se contenter, lors de l'utilisation d'un langage «artificiel» comme celui de l'informatique, de recueillir les règles de grammaire ou d'enregistrer et d'expliquer l'évolution historique de telle règle ou de tel phénomène, mais que nous devons analyser le langage comme «un système d'éléments interdépendants dont la finalité est d'assurer correctement la transmission des messages». (R. Boudon, 1968, p. 31)

Aussi V. Popov présente-t-il certaines limites des approches classique en IA :

«Dans tous les domaine abordés par l'IA, on constate les limites des approches classiques fondées sur des traitements symboliques et logiques. Des nouvelles approches se dégagent, utilisant d'autres outils théoriques, issus de recherches menées dans différents domaines comme la biologie, la physique qualitative, l'IA distribuée, la modélisation probabiliste du raisonnement, le développement des techniques d'optimisation, de méthodes connexionnistes. Toutes ces approches se caractérisent par une remise en cause plus ou moins profonde des présupposés de l'IA, telle qu'elle a été définie à ses débuts. (Pearl, 1991 ; Mac Key, 1992 ; Robert, 1991)

Une voie prometteuse à notre avis, dans la résolution des problèmes de la conception de scène réside dans l'intégration a) de connaissances hybrides - heuristiques et causales probabilistes, b) des modèles de description issus du domaine des systèmes de recherche automatique d'informations et de la modélisation déclarative géométrique, c) des méthodes qualitatives et quantitatives de résolution de contraintes spatiales et géométriques.» (1999, chap. 1, p. 19)

Toujours selon V. Popov, le raisonnement qualitatif appelé initialement physique naïf, essayait d'appréhender les raisonnements de sens commun que l'homme met en œuvre pour comprendre le fonctionnement de systèmes physiques. Cet axe a donné lieu au développement de plusieurs formalismes pour représenter des connaissances et raisonner à partir d'elles en termes qualitatifs, ce qui explique le terme de raisonnement qualitatif adopté aujourd'hui.

Le raisonnement à base de modèles cherche à trouver les causes des phénomènes observés dans un système. Cette dénomination a été adoptée pour marquer l'opposition avec l'approche utilisée par les système experts de première génération reposant sur une connaissance de «surface» de type associationniste entre causes et phénomènes. Dans ce cas, on utilise une connaissance «profonde» sous forme de modèles structurels et de comportement connu du système à observer, connaissance en partie issue des lois du domaine du système. Le raisonnement est fait en comparant les prédictions faites sur les phénomènes à partir des modèles connus et les observations de phénomènes provenant du système réel, en détectant les contradictions entre les deux et en provoquant les causes possibles du phénomène à partir du chemin d'inférence, qui a conduit à une contradiction.

V. Popov souligne qu'un cadre théorique de ce principe a été déjà mis en place. Dans ce cadre, l'aspect temporel doit être pris en compte dans le processus de raisonnement et il est aussi un élément fondamental de l'étude de la causalité qui intervient dans le raisonnement qualitatif. Les modèles de raisonnement à base de modèles permettant de construire des modèles sont, suivant les travaux auxquels on se réfère, qualifiés d'«abductifs» ou d'inductifs. (Peng et Reggia, 1990)

En s'inspirant de ces recherches, V. Popov rappelle que :

« Concevoir une scène peut être interprété comme la construction d'une ou plusieurs hypothèses, associées aux buts de la conception, selon lesquelles la présence de la forme géométrique particulière du but, est expliquée par la présence des composants - primitives dans cette scène et ses propriétés, couvrant de manière causale les buts. C'est un processus de raisonnement dit par abduction, qui s'applique lorsque les hypothèses à construire et les phénomènes à expliquer sont de nature factuelle.» (1999, chap. 1, pp. 19-20)

Finalement, les résultats de mes recherches sur les langages rejoignent ceux de V. Popov, ainsi que les travaux réalisés en sémantique formelle de l'espace, qui étudient des textes décrivant des phénomènes spatiaux et qui montrent que la géométrie classique ne suffit pas pour représenter et calculer le discours sur l'espace.

Chapitre 10 L'expérimentation sur les opérateurs sémantiques

Faire de l'expérimentation en architecture est souvent source de débats, d'autant que les notions de recherche et de projet sont souvent mises en dualité et que la présence de l'informatique a contribué à augmenter cette dualité entre la recherche et le projet. Dans un document sur *La recherche et la pratique en architecture*, C. Parisel rappelle que «La symbiose entre la recherche et la profession ne trouvera sa voie que si on réunit deux conditions : d'abord s'intéresser aux processus de résolution de problèmes et ne considérer les résultats que comme moyen de mesurer l'efficacité du processus et ensuite, diffuser largement les processus jugés plus performants. C'est le défi que nous nous sommes donné pour tout le domaine de la conception assistée par ordinateur». (1997)

C. Parisel poursuit en disant que les outils de CAO actuels sont conçus pour exprimer un résultat géométrique, une forme parfaitement définie et non des contraintes: «ainsi aucun outil ne permet d'énoncer la décision d'avoir une pièce à 6 faces sans que vous ne soyez obligé de définir les dimensions et les angles précisément. Pour permettre de régler successivement les choix au nombre de faces (topologie), à leur coplanarité (projectif) à leur parallélisme (affine) et à leur dimension (métrique), il faut disposer de tous les niveaux de définition géométrique». Il souligne aussi que le processus de décision est exprimé par une action humaine qui n'est pas explicite dans un cadre interactif et que c'est seulement le résultat de l'action qui est explicite. Par exemple, quand on place deux colonnes et puis une poutre «par-dessus», ce positionnement n'est pas exprimé comme une relation à maintenir. Ces relations peuvent être finalement encodées par un programme informatique qui peut proposer une gamme de cas particuliers qui n'ont en commun que la manière dont il sont conçus. Nous pouvons ainsi produire sous une forme exécutable, c'est-à-dire qui génère des formes physiques, des techniques de construction.

En m'inspirant de ces idées sur la modélisation volumique, j'ai mis à l'épreuve un modèle, pour valider une série d'opérateurs sémantiques. Pour créer ce modèle j'ai repris la problématique que j'avais formulée au début de cette investigation :

«Et finalement, si on me proposait de faire un théâtre, comment procéderais-je? Ferais-je appel aux précédents de Vitruve? Quels outils utiliserais-je? Quel langage de

figuration permettrait de traiter des opérateurs géométriques en même temps que des opérateurs sémantiques? Comment ces opérateurs pourraient-ils contribuer au transfert de connaissances? Aurais-je besoin des dessins?»

Comprendre, expliquer et vérifier. C'est dans cette perspective que j'ai étudié les modèles de conception en CAAO, en mettant en évidence le rôle d'intermédiation que ces modèles jouent entre les différents acteurs : «le phénomène lui-même, un concepteur considéré individuellement et le collectif des concepteurs». (Adreit, 1998, p. 73) Le but de cette étude est de contribuer à un changement de paradigme dans la communication en architecture. Comme le soulignent J. Artigues et N. Lebtahi dans les actes de la rencontre MCX 99 à Aix-en-Provence, que :

«Le projet d'architecture, pris comme expérimentation particulière de la notion de projet, résulte d'un processus d'actions qui ne peut se réaliser qu'après avoir été initialisé par un choix d'ordre conceptuel, établissant l'architecture comme élément médiateur entre un corpus d'idées et une fonction sociale à accomplir.

L'objet, qui concrétise le projet, émerge au sein d'un processus qui à la fois le détermine et l'utilise pour s'accomplir lui-même.» (1999, p. 14)

Ces chercheurs rappellent aussi que «par habitude, nous avons tendance à confondre la notion de projet avec la réponse visible au processus qui a induit son émergence. Cependant, la nature des processus de conception et la nature des processus de production d'objets sont probablement différentes, et le processus de conception est d'autant plus occulté au bénéfice de la notion tout aussi imprécise de «création», que l'objet produit revêt un caractère spectaculaire». (1999)

Il ne faut pas, disent-ils, superposer le domaine du processus de conception à celui d'un concepteur, de la même façon que l'architecte n'a pas le monopole de la conception :

«Le concepteur, situé dans le processus du projet, est la condition nécessaire pour que la conception s'exerce ; les concepteurs, dans leur ensemble, sont la condition nécessaire pour que le processus du projet se réalise. Pour chacun des concepteurs, il y a création d'un "point de vue" sur l'organisation des processus, donnant à chacun d'eux la vision particulière qui constituera le cadre de son action. Le processus du projet apparaît au concepteur comme l'enchaînement des actions entreprises pour répondre à une finalité justifiant son action, et le processus de conception comme ayant eu pour objet de concevoir une telle finalité susceptible d'induire un tel processus d'actions. À lui de reproduire ces processus au sein du cadre qui

lui a été défini, pour former le temps suivant du processus du projet.» (1999, p.14)

Dans cette optique, il est important d'«attribuer au processus de conception le domaine des finalités, et au processus de projet le domaine des objets produits», ce qui nous permet de donner un point de vue particulier sur l'organisation même du processus de conception. En effet, Artigues et N. Lebtahi soulignent que «si le processus du projet s'exprime par un enchaînement linéaire de productions d'objets, le processus de conception, dans sa formulation implicite des finalités, semble au contraire suivre un itinéraire à la fois inclusif et récursif. Inclusif, parce qu'une finalité particulière trouve ses conditions d'émergence et d'exercice à partir d'un objet produit par une finalité d'un ordre plus général, pour devenir elle-même finalité générale et créer le contexte d'élaboration d'autres finalités particulières. Et récursif, parce qu'il n'y a pas d'autres raisons pour limiter ce processus que l'étrécissement de vue d'un concepteur situé sur un point quelconque du processus du projet». (1999, pp. 14-15)

En partant de ce modèle théorique, j'ai pris le projet d'architecture comme expérimentation particulière pour la compréhension, l'explication et la vérification d'opérateurs sémantiques qui gouvernent la première phase de création du projet architectural.

J'ai choisi, comme langage artificiel pour communiquer l'expérimentation le dialecte fonctionnel *Scheme*. Le choix de ce langage est le résultat heuristique des maquettes procédurales étudiées et tout particulièrement des travaux de M. Bogdan (1997) sur la modélisation des processus de construction des voûtes.

À ces travaux, j'ai relié mon expérimentation sur une maquette procédurale totalement originale qui montre la possibilité d'encapsuler des opérateurs sémantiques, dès le début du processus de conception, et qui propose d'explorer de nouvelles voies qui dépassent les maquettes procédurales explorées jusqu'à maintenant.

Pour la visualisation des opérateurs sémantiques nous avons fait appel aux fonctions du logiciel SGDL qui pourrait être un type de modeleur volumique qui prendra en charge par la suite, les descriptions de processus, comme l'a déjà montré T. Tidafi en 1996, par la modélisation des actions.

10.1 Un modèle de formulation et de résolution de problèmes

L'ordinateur est de plus en plus utilisé dans les ateliers des professionnels et des étudiants en architecture, mais son utilisation reste confinée à des fonctions techniques (*tekhnê*) et ce que l'on appelle couramment CAO n'est souvent en architecture que de la DAO ou encore de la FAO. Les travaux de modélisation volumique, par exemple, sont plus proches d'une fabrication de modèles et, tout en ayant dans certains cas ajouté aux modèles géométriques des savoir-faire et des descriptions de processus de projet, ils ne comportent pas une description du processus de conception qui tienne compte du «savoir» du concepteur. Cette dialectique entre le processus de projet et le processus de conception est le défi d'une modélisation des opérateurs sémantiques.

Par cette expérimentation, je propose de réfléchir sur les méthodes de travail de l'architecte et d'indiquer une voie d'exploration pour la conception qui étudie la «projetation» par les propriétés et les performances de l'objet (opérateurs). Le but étant de proposer une nouvelle approche à la conception par des maquettes procédurales. Cette réflexion veut enfin encourager une remise en question des programmes d'enseignement basés sur les divisions disciplinaires traditionnelles et qui, en particulier, divisent les savoirs ainsi que les savoir-faire dans le monde de l'architecture.

Je me situe dans un paradigme qui m'amène à représenter le bâtiment par des fonctions paramétrables qui, encapsulées algorithmiquement, donnent des maquettes procédurales d'aide à la conception. Cette expérimentation ouvre une nouvelle avenue qui permet d'inclure le *logos* (les propriétés sémantiques) et qui mène à une représentation métaphorique. Par ces maquettes procédurales nous pouvons montrer que d'un modèle générique nous pouvons produire un modèle à quatre dimensions qui encapsule le modèle volumique avec des caractéristiques sémantiques. Pour cela, nous utiliserons un langage méta-fonctionnel qui permet de modéliser les opérateurs et incorporer des informations qui proviennent des éléments de construction.

Par le biais d'une maquette procédurale du théâtre romain selon Vitruve, j'ai voulu comprendre, expliquer et valider que, par un modèle générique, nous pouvons produire un modèle volumique avec toutes les caractéristiques qui appartiennent à la même famille d'objets. Un tel modèle permet d'illustrer non seulement le résultat de

procédés ou processus et de prouver la parenté des bâtiments par leur procédé de construction, mais il permet surtout de vérifier une règle qui caractérise un ensemble d'objets par des opérateurs sémantiques qui pourront permettre l'établissement de protocoles assurant le dialogue entre les différents acteurs du processus de conception (la connaissance) et la maquette (la modélisation volumique).

Pour exprimer la méthode de construction, un langage fonctionnel permet la modélisation des actions. Pour exprimer les opérateurs sémantiques, ce même langage peut, par le même moyen, encapsuler et transmettre des propriétés conceptuelles que l'objet architectural pourra avoir ou non, ce qui fait la force de l'approche nouvelle que je propose. Il s'agit d'un raisonnement fondé sur une formalisation générique de l'ensemble des connaissances nécessaires à la conception qui sont liées aux différentes contraintes de conception à respecter, à l'objet architectural à concevoir et aux processus de conception.

Ce mécanisme de description est extrêmement puissant. Il permet d'établir les relations entre les fonctions. Il permet de comprendre le but ou l'objectif du processus du projet architectural ou des propriétés du bâtiment par l'héritage (mémoire) des caractéristiques des classes communes qui donnent lieu à une nouvelle figuration et à un processus de conception absolument original.

L'apport scientifique de cette expérience est la validation de l'hypothèse voulant que nous pouvons intervenir, grâce aux outils informatiques, sur des opérateurs qui permettent à l'architecte de se réapproprier une conception complexe du bâtiment. Et cela, dans un contexte où l'architecte entreprend la conception avec un manque d'informations sur les aspects non géométriques des objets et par une définition non précise de l'objet à créer. Et enfin, cette expérience démontre qu'il est possible de modéliser les liens entre les scènes de conception pendant le processus de figuration et de décision et de transformer les opérateurs géométriques en opérateurs sémantiques.

La différence entre ces nouvelles expériences et ce qui a déjà été montré et validé réside dans l'effort d'encapsuler des opérateurs qui jusqu'à maintenant n'étaient pas pris en compte lors de la modélisation géométrique parce que encore mal définis. Il s'agit d'encapsuler la raison de l'objet et ses qualités. Il s'agit d'«informer» l'œil de l'architecte, par un ensemble de solutions «provisoires» pour lui permettre de «choisir» ; ces descriptions peuvent mener à une infinité de modèles, comme c'est le cas lors

napkin sketch, mais elles sont déjà une figuration parce qu'elles contiennent au départ les qualités de l'objet obtenu par la modélisation d'opérateurs que j'appelle sémantiques.

Cette expérience fait appel à l'outil informatique comme outil rassembleur et fédératif des disciplines qui participent à la formation de la profession d'architecte et elle fait ressortir le caractère de l'architecture comme l'art de bâtir un lien entre le fonctionnel et l'opérateur. Cette expérimentation se base :

- sur les résultats des recherches sur la compréhension des blocages qui limitent l'utilisation de l'ordinateur pour la conception ;
- sur la maquette procédurale construite à partir de la description du théâtre romain par Vitruve (Ier siècle av. J.-C.) qui demande à l'ordinateur d'agir comme outil pour obtenir des figurations que nous pouvons «gouverner» par un langage fonctionnel.

10.2 Mise en situation

Au tout début de cette thèse, j'ai souligné que parler d'architecture signifie en premier lieu parler de conception, d'idée, d'image, de symbole, de l'être humain, et de l'importance de trouver une méthode claire qui définisse l'essence de l'architecture en vue d'adopter un langage qui s'exprime par systèmes combinatoires du point de vue de la signification de la méthode et des moyens.

À ces affirmations, j'ajoute que l'architecture est la concrétisation d'idées combinatoires et de gestes d'inclusion de paramètres qui définissent la complexité du bâtiment. Ce sont ces paramètres, que nous appellerons opérateurs, que j'ai voulu comprendre et modéliser ; ces paramètres qui, dans l'évolution du processus du projet d'architecture ont été, avec le temps, écartés par les outils de représentation comme la représentation graphique sur papier ou sur table traçante.

J'ai aussi souligné que l'architecte utilise le dessin comme outil de travail et c'est ce dessein de l'architecture qui l'a amené au dessin et aux choix réducteurs du parti architectural en simplifiant la notion de projet et en cherchant à réduire, d'un point de

vue systémique, la complexité du bâtiment au lieu de considérer cette complexité comme une qualité.

Enfin, l'architecture relève de la création, de la connaissance technique et de la sensibilité sociale que les programmes d'enseignement de cette discipline, un peu partout en Occident, prêchent, mais en même temps, continuent de traiter comme des disciplines distinctes. C'est seulement par une fédération des savoirs de la création, de la technique et du social que nous pouvons utiliser l'ordinateur comme outil de conception et l'informatique est une discipline qui peut redonner à l'architecte son statut d'origine ; statut où le faire pratique (*technê*) et le faire poétique (*poïesis*) ne sont qu'un.

L'objet de cette expérimentation s'intègre aux recherches menées dans la dernière décennie par les chercheurs et les ordres professionnels sur la compréhension des blocages qui limitent l'utilisation de l'ordinateur pour la conception, et sur l'explication des liens entre la communication visuelle et l'informatique dans le domaine de l'architecture, et aux résultats des travaux que j'ai entrepris sur la conception en architecture et sur les méthodes de travail des architectes. L'outil informatique est vu comme un outil rassembleur qui permet de représenter les opérations essentielles de l'architecte pendant sa première phase de conception. Il s'agit d'expliquer les problèmes à résoudre pour établir un langage commun entre les différents acteurs et proposer des voies de solution, tout en tenant compte que l'architecte a développé un langage et des méthodes de travail adaptés à la représentation bidimensionnelle, et proposer un changement de langage pour la figuration qui favorise la pleine exploitation de cette technologie. (De Paoli, 1997)

Les traités sur l'architecture, du *De Architectura* de Vitruve (Ier siècle av. J.-C.), en passant par *L'architecture pratique* de Bullet (1691), par le *Traité sur l'art de bâtir* de Rondelet (1802), et le *Précis d'architecture* de Durand (1825), nous permettaient de comprendre et de représenter géométriquement les objets décrits, mais non le savoir-faire ou le savoir. Le même Vitruve, suivi à la Renaissance par Alberti et plusieurs penseurs-chercheurs, nous rappelle dans ses textes que «quand il en est besoin, il faut faire appel à l'esprit inventif de l'architecte pour trouver des nouveaux expédients», (Dalmas, 1986) et qu'il faut observer certaines règles implicites. Aussi, à la fin du quinzième siècle, Pier de la Francesca proposait dans *De Prospectiva pingendi*, une nouvelle recherche où la dimension euclidienne s'enrichissait de notions de géométrie

projective et perceptive, de relations entre physiologie et espace et entre ce que l'on voit et ce que ne l'on voit pas. (Aprea, 1997)

Les travaux de recherche de cette dernière décennie, orientés vers la modélisation des actions et du processus du projet architectural, nous confortent dans l'idée que ces règles peuvent être transformées en fonctions modélisées et donner un résultat géométrique et représentatif ou, comme le suggèrent certains chercheurs, figuratif :

«Figurer un objet architectural c'est le présenter à son regard ou à son esprit de telle façon qu'on puisse en appréhender un aspect choisi. Un peu à la manière dont, pour explorer un modèle réduit, la main l'éloigne du regard pour en avoir une vision distanciée, l'élève à la hauteur des yeux pour en saisir la composition ou en saisir la structure, le pose sur une table pour tourner autour et le parcourir des yeux. N'oublions pas toutefois que pour l'architecte, l'objet n'existe pas, il est à inventer.» (Boudon, 1989)

Dans la recherche réalisée par M. Bogdan, présentée précédemment pour illustrer les maquettes procédurales, recherche qui avait comme but principal la modélisation de la technique de construction des voûtes d'arête byzantines et, par le fait même, la modélisation du savoir-faire des Byzantins dans la construction des voûtes, nous avons pu comprendre et expliquer un lien entre le fonctionnel et l'opérateur. Le fonctionnel étant la fonction de la voûte et l'opérateur le savoir-faire des bâtisseurs de l'époque. (Bogdan, 1997)

Je situe cette expérience, tout comme celle de C. Parisel sur les dômes géodésiques, dans un paradigme qui nous amène à des figurations par des fonctions paramétrables qui, encapsulées algorithmiquement, donnent des maquettes procédurales d'aide à la conception. Ces maquettes permettent de comprendre et de concevoir dans un univers sémique qui ne réduit pas la représentation graphique à un simple rôle de signe ou image. Cette approche veut ouvrir une voie, comme le demandait déjà S. Ferro (1987) il y a une dizaine d'années dans un article sur *la fonction modélisante du dessin à la Renaissance*, qui permette d'ajouter le *logos* à l'équation métaphorique de la représentation où actuellement le dessin prend la place de l'écrit en épurant la pensée.

Pour éviter le sentiment de frustration qui anime l'architecte en situation de conception avec l'ordinateur, la communication avec la machine doit prévoir la conception d'un langage commun homme-machine, un langage suffisamment léger pour convenir à l'homme et suffisamment précis pour convenir à la machine. Un langage

bref, sans ambiguïté, sans formules compliquées. (Ganascia, 1993) Le problème aujourd'hui ne réside plus dans la capacité de calcul ou de mémoire des ordinateurs, mais dans la capacité que nous avons de lui fournir des instructions cohérentes et pertinentes qui seront par la suite interprétées. Il s'agit de communication entre les acteurs du projet architectural et les machines.

La recherche en CAO, au cours de cette dernière décennie, accorde une importance de plus en plus grandissante à l'ergonomie et aux sciences cognitives. En effet, si du côté purement informatique, le développement de systèmes experts et de méthodes de communication a atteint une certaine maturité dans le traitement de l'information, du côté du dialogue coopératif et intelligent avec la machine ordinateur, les progrès n'ont pas suivi de la même manière. Si bien qu'encore aujourd'hui, dans le domaine de l'architecture, nous ne pouvons pas parler de conception assistée par ordinateur. Cette expérimentation propose une voie de solution qui permet à l'utilisateur d'être aidé par la machine sans que celle-ci se substitue à lui dans des tâches difficiles comme la prise de décision au cours de la conception. (Garcia, 1991)

Cette voie passe par un type de dialogue qui tient compte d'une façon accrue des facteurs humains, c'est-à-dire une voie où l'utilisateur-humain joue un rôle de contrôle et de décision prépondérant. Cette approche pourra influencer les architectes pour leur permettre de dépasser finalement ce blocage qui les empêche de profiter pleinement de cette nouvelle présence dans l'atelier de travail. L'ordinateur pourra tendre alors à remplacer les outils traditionnels pour élaborer le projet d'architecture, sous une forme totalement nouvelle.

Je veux, par cette démarche, spécifier et valider des opérateurs qui aident à la conception et à la construction d'un modèle volumique unique, où la conception passe par la définition des propriétés de l'objet à concevoir telles la lumière, l'acoustique ou la matière, pour arriver à une figuration complexe du modèle qui tienne compte de la forme, de la description du bâtiment et de cette intelligence sous-jacente que nous ne pouvons pas modéliser. Cette démarche nécessitera par la suite, comme l'a déjà souligné T. Tidafi, (1996) une description géométrique précise de l'objet et pour atteindre ce lien dialectique, nous décrivons la forme par une approche qui permet la description des caractéristiques sémantiques du modèle. De cette façon, je propose de gouverner des maquettes procédurales qui seront l'outil d'aide à la conception permettant à l'architecte de sortir des blocages que j'ai identifiés.

Et lorsque les propriétés à modéliser permettent de multiples infinités de modèles volumiques, nous pouvons procéder, comme l'architecte ou le concepteur, à une génération de modèles à évaluer, parfois en procédant par le hasard, parfois par le choix des possibilités ou encore par une technique combinatoire des états possibles de chaque variable.

L'informatique n'est pas une fin en soi, mais la connaissance et la maîtrise de ses nouveaux outils peuvent apporter à l'architecte un nouvel éclairage aux problèmes de la conception architecturale, l'aider à améliorer les méthodes classiques et à accélérer la mise au point de méthodes nouvelles dans l'élaboration du projet architectural. Par le biais de l'informatique, nous évoluons vers un projet qui consiste à établir un pont entre les méthodes architecturales classiques et nouvelles. (De Paoli et Marty, 1996)

L'étude réalisée sur les méthodes de travail des architectes et l'adoption de cet outil a mis en évidence un blocage concernant l'utilisation de la CAO. Ce blocage, je l'ai identifié comme une limitation dans la manipulation imprécise et partielle des connaissances sémantiques qui participent à la création de l'objet architectural. Ce blocage se traduit par l'impossibilité de transmettre à l'ordinateur les propriétés que l'œuvre architecturale doit avoir, pour en extraire une figuration qui exprime le processus de genèse, la logique constructive et les contraintes dimensionnelles ou les relations avec d'autres types d'informations non géométriques. La liberté de choisir de l'architecte est limitée par l'assemblage de primitives géométriques qui n'expriment pas l'idée architecturale.

D'autres études confirment et démontrent ce blocage. Par exemple, M. Léglise, en décrivant les recherches dans le domaine de l'informatique appliquée à l'architecture nous rappelle que :

«les outils informatiques dits d'aide à la conception, dans le domaine de l'architecture sont généralement des outils d'instrumentation du projet (Burdese, 1989). Un de leurs buts principaux est, et on l'oublie trop souvent, tout simplement de «fonctionner» (Hamel, 1994). Parmi les principales critiques que l'on peut adresser à ces applications, certains auteurs relèvent la prééminence des possibilités de maniement de figures à caractère essentiellement géométriques (Jean C, 1995) au détriment d'une aide à la schématisation sous toutes ses formes y compris, bien entendu, verbale (Goulette, 96).» (Léglise, 1997, p. 27)

À la lecture des *Dix livres d'architecture* de Vitruve, nous pouvons retrouver une similitude dans l'activité conceptuelle de l'architecte romain qui, contraint par les règles des ordres et le code, risquait de réduire la conception à une architecture indéformable s'il ne faisait pas appel à «la preuve du talent autant que du savoir, selon que le lieu, l'usage et la beauté le demandent, de retrancher ou ajouter pour [...] faire toutes les modifications indispensables». (Dalmas, 1986, p. 8) C'est justement ce talent et ce savoir que les architectes ne peuvent pas encore aujourd'hui exprimer avec les outils de conception fournis par les ordinateurs.

À l'époque romaine, la méthode de construction était basée sur des opérateurs qui permettaient la réalisation de théâtres similaires ; certes les paramètres pouvaient varier, mais ces paramètres n'avaient pas la possibilité d'avoir une fonction évolutive : l'architecte ne pouvait pas modifier l'échelle des mesures et la valeur des rapports fixés par le code de Vitruve.

Dans son traité de l'architecture romaine, Vitruve établit la nomenclature des règles de l'art qui font la solidité de cet ouvrage et que A. Dalmas, dans la présentation de la traduction des textes de Vitruve, résume ainsi :

- «le volume d'un édifice doit surgir en même temps que le plan, la coupe et la façade ;
- l'édifice lui-même doit se placer dans la silhouette générale d'un lieu donné ;
- le choix du lieu est déterminé par les conditions de climat ;
- la beauté de l'édifice, celle de la cité sont l'effet de l'exposition la plus franche et la plus nette de la fin que l'architecte se propose d'obtenir.» (Dalmas, 1986, p. 12)

Ce sont ces paramètres : les proportions, l'harmonie, le climat, la beauté qui sont encore aujourd'hui, absents dans le contexte informatique de la CAO, ce qui ne permet pas à l'architecte d'évoluer pleinement dans la maîtrise de cet outil.

E. Morin (1994) nous rappelle que : «la difficulté de la pensée complexe est qu'elle doit affronter le fouillis (le jeu infini des inter-rétroactions), la solidarité des phénomènes entre eux, le brouillard, l'incertitude, la contradiction. Mais nous pouvons élaborer quelques-uns des outils conceptuels, quelques-uns des principes pour cette aventure, et nous pouvons entrevoir le visage du nouveau paradigme de complexité qui devrait émerger». (p. 22) Imbriquer la sémantique dans la genèse du bâtiment et ses

propriétés est un pas supplémentaire dans cette direction vers un système ouvert. Par l'informatique, l'architecte pourra naviguer dans le traitement expert des données, en dépassant ce que A. Alexander et bien d'autres chercheurs, depuis les années soixante, appellent le *problem solving*.

Le travail de conceptualisation, de modélisation des opérateurs s'est échelonné sur presque deux ans. La première partie a été la conceptualisation et le choix des expériences. Ce choix devait contenir une description sémantique claire et compréhensible et des exemples réels de réalisations et de figurations. Par la suite, il s'agissait de choisir les outils et les instruments pour produire l'expérience et enfin choisir des opérateurs sémantiques qui représentent des qualités et des performances pour valider mon hypothèse.

Deux expérimentations sont totalement originales. Une qui permet d'imbriquer un opérateur sémantique, la visibilité aux opérateurs géométriques, l'autre qui permet d'imbriquer un opérateur sémantique, la visibilité à un autre opérateur sémantique, l'acoustique. Ces expériences ont été testées, validées et par la suite présentées dans deux articles et deux communications respectivement au congrès de *CAADRIA99* et de *CAADFutures99*, ce qui m'a permis de constater l'originalité des expérimentations et des résultats obtenus.

A.-P. Contandriopoulos (1989), dans *Savoir préparer une recherche*, rappelle que la recevabilité d'une proposition de recherche qui présente sous forme de modèle une solution théorique pour résoudre le problème soulevé, dépend du test qui accompagne ce modèle et qui le met à l'épreuve. Ce test doit convaincre de la cohérence du modèle proposé. Conséquemment j'ai procédé à la définition du modèle et de deux tests :

- le modèle : la description formelle du théâtre romain par Vitruve (Vitruve, Ier siècle av. J.-C.) nous permet d'interpréter les opérations de construction et de les grouper en modules (classes) que nous avons traduits en fonctions par l'utilisation d'un langage fonctionnel (*Scheme*) ;
- les tests : nous avons visualisé ces modules avec un logiciel ayant des fonctions de visualisation et utilisant le dialecte *Scheme* (SGDL). La figuration consiste dans une série de scènes tridimensionnelles qui métaphorisent non seulement la réalité constructive et temporelle, mais aussi les choix sémantiques. Le premier imbrique des opérateurs géométriques et sémantiques, le deuxième

seulement des opérateurs sémantiques, tout en gardant la genèse du test précédent.

10.3 La création de maquettes procédurales

Affirmer que l'architecture est la matérialisation d'idées et de paramètres qui définissent la complexité du bâtiment implique la modélisation de ces opérateurs et implique une solution à la visualisation de problèmes mal définis. «*Design problems are, as a rule, ill-defined. This implies that the initial state of a design problem may be vague, its goal state not clearly definite, and that no algorithm is available for the "journey" from the initial state to the goal state.*» (Goldsmith, 1997)

Selon G. Goldsmith, la conception est un *indeterministic and complex problem* dont la solution exige une recherche : une solution au problème de conception est une proposition de conception. Ce changement, dans l'«approche projet» actuelle, implique de comprendre que cette approche suggère de modifier la situation actuelle dans laquelle le projet est une fabrication presque industrielle de plans utilitaires principalement conçus pour la résolution de problèmes techniques. Une approche qui imbrique réalités sémantiques et problèmes techniques constitue une modification importante dans la figuration parce qu'elle permet d'analyser toute la puissance des propriétés spatiales où l'homme marche et vit pendant tout le processus de conception.

Les recherches menées sur les méthodes de travail et l'adoption de l'outil informatique ont montré, à plusieurs reprises, les blocages dans l'utilisation de la CAO : l'impossibilité de transmettre à l'ordinateur les propriétés conceptuelles que le modèle doit avoir pour produire une figuration.

Plusieurs recherches (Tidafi, 1966 ; Pho, 1997 ; Rotgé, 1997) ont montré que la figuration avec des langages fonctionnels permet de décrire des processus comme la genèse du bâtiment ou les techniques de construction, mais nous n'avons pas encore de solutions informatiques qui permettent au concepteur de transiger avec des informations conceptuelles ou sémantiques. Et le résultat des recherches menées sur les langages porte à croire que pour «concevoir avec un ordinateur» il faut créer une situation d'interaction causal-probalistique. (Popova et De Paoli, 1998)

Cette approche trouve sa cohérence dans les caractéristiques de la modélisation déclarative qui permet une certaine inexactitude et imperfection dans la description du modèle. Avec cette approche, le rôle des macro-instructions permet une modélisation qui rappelle l'approche cognitive. Le rôle de ces macro-instructions est de créer un lien dialectique destiné à créer la base d'un savoir causal-probabiliste qui contient les connaissances des causes à effets et les liens entre ces connaissances.

Notre expérimentation vise dans ce contexte à créer et gouverner des maquettes procédurales avec un langage fonctionnel et à montrer qu'elles contiennent la connaissance et les liens nécessaires pour, à une étape ultérieure, le développement de logiciels dans un nouveau paradigme de modélisation.

L'approche de type «impératif» qui a permis le développement des premiers systèmes informatiques n'a pas permis un bon développement d'un langage informatique pour l'architecture. L'aide à la conception par ordinateur ne doit pas être seulement un outil de résolution de problèmes, mais plus encore un outil de «création», de formulation de solutions, pendant le processus de conception. Seulement ce type d'approche permet à tous les acteurs du projet de faire appel à l'ordinateur comme outil de compréhension. Rappelons que la création porte sur l'adéquation entre l'objet créé et la performance recherchée et qu'on devrait distinguer création de solutions (performances) de création d'objectifs (critères).

Pour tester cette approche, nous avons demandé à l'ordinateur de fonctionner comme un outil qui permet d'obtenir des figurations qui peuvent être gouvernées par un langage fonctionnel ; par la suite nous avons concentré nos efforts sur la recherche, la création et l'optimisation de fonctions, que j'ai appelées sémantiques, comme la visibilité et l'acoustique, pour comprendre comment un langage fonctionnel peut créer un système intelligent pour la représentation du bâtiment. Pour atteindre cet objectif, j'ai étudié différentes approches cognitives et ergonomiques, la représentation des scènes par la conception déclarative (Popova et De Paoli, 1998) et le langage fonctionnel pour la création des maquettes procédurales (De Paoli et Bogdan, 1998, 1999), pour finalement présenter un ensemble de meta-fonctions qui montrent que, par la modélisation d'opérateurs sémantiques, l'ordinateur n'est pas seulement un outil d'aide pendant le processus de design, mais aussi un outil pour la compréhension des propriétés conceptuelles du bâtiment dans une situation de *collaborative design*.

10.4 Description de l'expérimentation : les tests

La première partie de l'expérimentation est de type cognitif. Elle s'inspire des deux maquettes procédurales, celle sur le dôme de B. Fuller et celle sur la voûte byzantine. La lecture de ces deux «discours» de type procédural permet d'appuyer l'expérience sur des précédents, tout comme le projet en architecture. La première montre la validité et l'importance de la compréhension géométrique de la forme et de sa création. Les scripts qui règlent les polyèdres de départ permettent de comprendre qu'il est difficile de trouver un principe mathématique ou géométrique unique qui permette de construire tous les cas observés et de comprendre aussi l'importance pour optimiser le processus, d'opter pour une approche qui permettra de produire toutes les variantes décrites. Et, comme le souligne C. Parisel, «la solution qui apparaît la plus générale consiste à bâtir des fonctions... De même, cette géométrie sera «matérialisée» par des fonctions volumiques».

La maquette procédurale sur les voûtes byzantines permet non seulement de comprendre le savoir-faire des Byzantins, elle permet de comprendre les relations entre le fonctionnel et l'opérateur. Le fonctionnel étant l'intention (fonction) de la voûte et l'opérateur la connaissance (le savoir-faire) des bâtisseurs. L'utilisation des fonctions créées par M. Bogdan pour modéliser la voûte ont permis de transférer ce savoir-faire dans une méta-fonction qui sert d'opérateur et par l'héritage, contenu dans cette fonction de départ, créer une nouvelle maquette procédurale du théâtre de Vitruve. (Figure 91)

M-voutebyzantine (n, h, k)

n = largeur de la voûte; h = surbaissement; k = nombre de tranches de brique.

Les autres éléments, tels l'épaisseur de la voûte, la profondeur des arcs ou l'inclinaison des tranches, peuvent être contrôlés dans le script même



$n=4, h=-1.5, k=25$



$n=4, h=-1, k=25$



$n=4, h=-0.5, k=25$



$n=4, h=0, k=25$



$n=4, h=0.5, k=25$



$n=4, h=1, k=25$



$n=4, h=1.5, k=25$



$n=4, h=2, k=25$

Figure 91. Modélisation du processus de construction de la voûte byzantine (M. Bogdan, 1997)

Cette expérimentation montre, de plus, l'utilité d'une encyclopédie discursive de l'objet, et la nécessité de créer des outils qui permettent de consigner ces connaissances que l'ordinateur pourrait lire, et puis de les transformer, pour un traitement ultérieur de l'information.

L'innovation de notre démarche réside dans le transfert de ce savoir-faire et de ses fonctions à la modélisation de n'importe quel autre système de construction. C'est ce qu'on a réalisé en transférant les fonctions de la voûte byzantine au théâtre romain. J'ai voulu démontrer par cela que, de la même façon que dans l'évolution du bâtiment et de son histoire, il y a un transfert de connaissances, de la même manière nous pouvons procéder à un transfert de connaissances par des fonctions entre maquettes procédurales pour aboutir à la création de bibliothèques de fonctions spécifiques qui permettent non seulement la modélisation rapide et efficace de tout bâtiment appartenant à la même aire culturelle, mais aussi le transfert de savoir-faire aux aires culturelles subséquentes.

Les tableaux et les figures qui suivent décrivent les phases de l'expérimentation :

- tableau A : exemple d'étude par primitives géométriques (programme de représentation par primitives géométriques). Ce tableau présente le devis descriptif de théâtre décrit par Vitruve. Ce devis, comme le soulignait T. Tidafi (1996), lors de la mise à l'épreuve de ses expériences, est l'outil qui présente la structure qui sert à observer les variables. Les images proposées sont le résultat analytique des textes de Vitruve, vues par A. Choisy (1841-1909), dans ses illustrations de *De Architectura de Vitruve* et A. D'Espouy dans *Les fragments d'architecture antique*. Ces images interprètent le théâtre par un discours de géométrie descriptive avec des primitives géométriques tracées sur papier : les opérateurs sont géométriques. (Figure 92)

Tableau A

Projétation par primitives géométriques	<i>De conformationes theatri facienda</i> (Vitruve, traduction de A. Dalmas 1986)
<div data-bbox="402 409 836 703" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="511 718 711 745">Fonction : Estrade</p> <p data-bbox="409 766 815 892"><i>De Architectura, Vitruve</i>, interprété et traduit par A. Choisy</p> <div data-bbox="402 892 820 1165" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="511 1180 711 1207">Fonction : Gradins</p> <p data-bbox="389 1228 824 1354">Coupe des gradins, Reconstitution de l'espace intérieur du théâtre, selon André d'Espouy</p>	<p data-bbox="863 357 1421 808"> Pour dessiner le plan du théâtre, il faut après avoir placé son centre, décrire un cercle dont la circonférence forme le circuit du bas du théâtre ; dans cette circonférence il faut inscrire quatre triangles équilatéraux, et disposés par intervalles égaux, de sorte que les sommets de leurs angles touchent la circonférence et la divisent de la même manière que le font les astrologues pour placer les douze signes célestes, d'après le rapport qui existe entre l'astronomie et la musique. </p> <p data-bbox="863 829 1421 1428"> Le côté des triangles qui est le plus près de la scène déterminera l'alignement de la face, à l'endroit où il coupe le cercle ; on tracera ensuite une autre ligne parallèle à celle-ci, et qui, en passant par le centre, séparera l'estrade du proscenium de l'emplacement de l'orchestre. Ainsi l'estrade sera plus large que celle des Grecs, et cela est nécessaire puisque chez nous, tous ceux qui jouent demeurent sur notre scène, et que l'orchestre est réservé pour les sièges des sénateurs. La hauteur de l'estrade ne doit pas être de plus de cinq pieds, afin que ceux qui sont assis dans l'orchestre puissent voir ce que font les acteurs. </p>

Figure 92. Exemple d'étude par primitives géométriques

- tableaux B1, B2, B3 et B4 : exemple d'étude par primitives géométriques et opérateurs ; création d'un programme de modélisation par fonctions. Ce tableau présente le devis descriptif du théâtre décrit par Vitruve avec des descriptions sémantiques et conceptuelles. Les images proposées sont le résultat analytique des textes de Vitruve, vues par G. De Paoli et M. Bogdan et réalisées avec un programme de dessin par ordinateur¹. Ces images interprètent le théâtre par un discours de primitives géométriques et un langage impératif avec un résultat pour la table traçante : les opérateurs sont géométriques, leur manipulation informatique ne permet pas la description sémantique présente dans le texte de Vitruve. (Figure 93) Par exemple, il n'est pas possible d'encapsuler le savoir qui lie l'astronomie à la musique ou celui qui lie les spectateurs à la visibilité, ou encore celui qui lie la visibilité et l'acoustique, parce que la relation n'est pas décrite explicitement. (Figures 94, 95, 96 et 97)

0	↻	↻
SECTION	0.2	7
2	9	5
HEADER	\$TRACEWID	3A
9	40	10
\$ACADVER	0.05.....	7.339467
1	.....
AC1009	VERTEX	0
9	8	VERTEX
\$INSBASE	LAYER-1	8
10	6	.....
0.0	CONTINUOUS	LINE
20	62	8
0.0	7	LAYER-1
30	5	6
0.0	39	CONTINUOUS
9	10	62
\$EXTMIN.....	0.0	5
.....	0	52
\$LTSCALE	VERTEX	10
40	8	9.181379
1.0	.....	.....
9	VERTEX	11
\$ATTMODE	8	0.0
70	LAYER-1	0
1	6	ENDSEC
9	CONTINUOUS	0
\$TEXTSIZE	62	EOF
	↻	↻
		Etc...

Figure 93. Exemple d'une partie du langage impératif et linéaire (DXF) pour la description du modèle du théâtre présenté dans le tableau B (opérateurs de type géométrique)

¹ Le programme utilisée est Autocad V. 14

Tableau B1

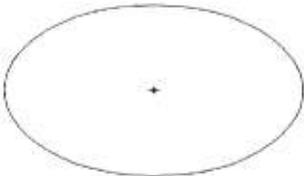
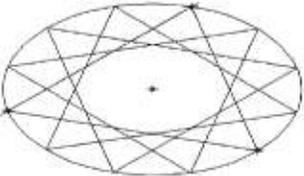
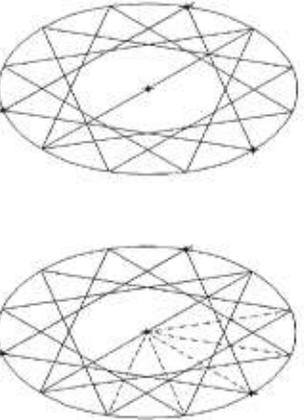
Projétation par primitives géométriques et analyse des opérateurs	<i>De conformationes theatri facienda</i> (Vitruve, traduction de A. Delmas 1986)
	<p>placé son centre, décrire un cercle dont la circonférence forme le circuit du bas du théâtre ;</p>
	<p>triangles équilatéraux, et disposés par intervalles égaux, de sorte que les sommets de leurs angles touchent la circonférence et la divisent de la même manière que le font les astrologues pour placer les douze signes célestes, d'après le rapport qui existe entre l'astronomie et la musique.</p>
	<p>déterminera l'alignement de la face, à l'endroit où il coupe le cercle ; on tracera ensuite une autre ligne parallèle à celle-ci, et qui, en passant par le centre, séparera l'estrade du proscenium de l'emplacement de l'orchestre. Ainsi l'estrade sera plus large que celle des Grecs, et cela est nécessaire puisque chez nous, tous ceux qui jouent demeurent sur notre scène, et que l'orchestre est réservé pour les sièges des sénateurs. La hauteur de l'estrade ne doit pas être de plus de cinq pieds, afin que ceux qui sont assis dans l'orchestre puissent voir ce que font les acteurs.</p>

Figure 94. Exemple d'étude par primitives géométriques et opérateurs

Tableau B2

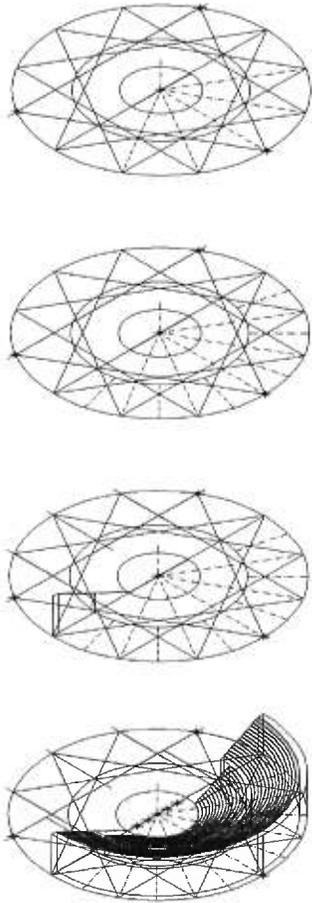
Projétation par primitives géométriques et analyse des opérateurs	<i>De conformationes theatri facienda</i> (Vitruve, traduction de A. Delmas 1986)
	<p>spectateurs dans le théâtre sont interrompus à tous les endroits où les angles des triangles touchent la circonférence du cercle, et ces points déterminent l'emplacement et la direction des escaliers qui font la séparation de ces secteurs jusqu'au premier palier.</p> <p>Les secteurs de degrés supérieurs sont séparés par d'autres passages qui, dans le plan d'en bas, partent du milieu des gradins inférieurs. Les angles qui indiquent la direction à donner aux escaliers qui sont entre les secteurs de degrés doivent être au nombre de sept, les cinq autres angles servent à régler la disposition des parties dont la scène est composée : ainsi, correspondant à l'angle du milieu, sera la porte royale, et, vis-à-vis, les deux angles qui sont à droite et à gauche, seront les portes des étrangers ; enfin au droit des deux derniers seront les passages qui se trouvent dans les angles.</p> <p>Les degrés sur lesquels on place les sièges des spectateurs ne doivent pas avoir moins d'un pied et une palme de hauteur, ni plus d'un pied et six doigts, et leur largeur ne doit pas être de plus de deux pieds et demi, ni de moins de deux pieds.</p>

Figure 95. Exemple d'étude par primitives géométriques et opérateurs

Tableau B3

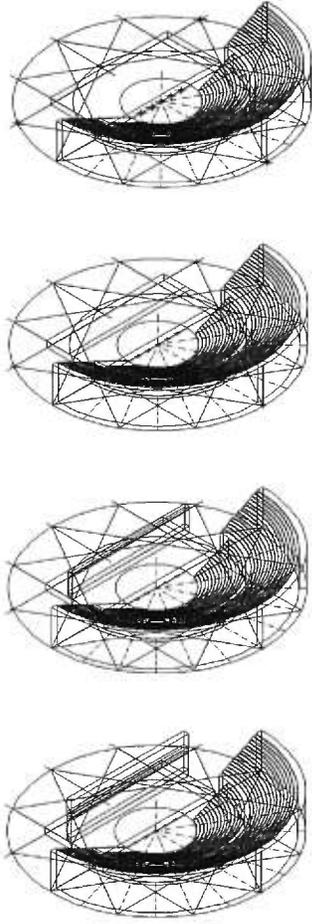
Projétation par primitives géométriques et analyse des opérateurs	<i>De conformationes theatri facienda</i> (Vitruve, traduction de A. Delmas 1986)
	<p>de l'orchestre, c'est-à-dire de l'espace qui est limité par les degrés inférieurs, et portant cette mesure sur les degrés inférieurs, on les coupera à plomb tant aux deux extrémités que dans leur circuit pour y percer les entrées et, à l'endroit où l'on aura ainsi retranché, on placera les linteaux des chambranles ; car il se trouvera assez d'échappés par-dessous.</p> <p>Il faut que la scène soit deux fois aussi longue que le diamètre de l'orchestre. Le piédestal qu'il faut poser au niveau de l'estrade doit avoir de hauteur, sa corniche et sa moulure comprises, la douzième partie du diamètre de l'Orchestre : sur ce piédestal il faudra poser les colonnes qui, avec leurs chapiteaux et leurs bases, auront la quatrième partie de ce diamètre. Les architraves et les autres ornements auront ensemble la cinquième partie des colonnes. Là-dessus il y aura un autre piédestal qui, avec sa corniche et sa moulure, n'aura que la moitié du piédestal d'en bas. Les colonnes que l'on posera sur ce piédestal seront d'un quart moins hautes que celles d'en bas.</p>

Figure 96. Exemple d'étude par primitives géométriques et opérateurs

Tableau B4

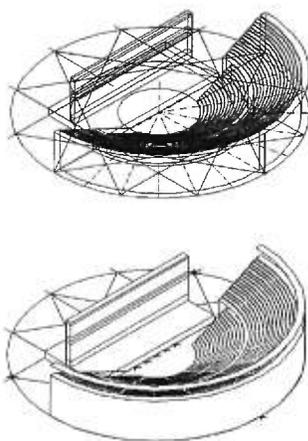
Projétation par primitives géométriques et analyse des opérateurs	<i>De conformationes theatri facienda</i> (Vitruve, traduction de A. Delmas 1986)
	<p>colonnes seront de la cinquième partie de la colonne : et si l'on met un troisième ordre de colonnes sur la scène, il faudra que le piédestal d'en haut soit de la moitié du piédestal du milieu. Ces colonnes du dernier ordre doivent être plus courtes de la quatrième partie que celles du second, et il faut que leurs architraves et autres ornements soient ensemble de la cinquième partie comme les autres. Quand on n'a pas les pièces de marbre ou de charpente, ou les autres matériaux de la grandeur requise, on peut alors retrancher quelque chose dans l'ouvrage, pourvu que cela ne soit point trop éloigné de la raison ; ce qui demande une grande expérience dans l'architecte, et un esprit inventif pour trouver de nouveaux expédients quand il en est besoin.</p>

Figure 97. Exemple d'étude par primitives géométriques et opérateurs

- tableau C (Figure 98), proposition pour une modélisation du processus de la manière de bâtir le théâtre. Ce tableau permet la compréhension du processus de modélisation. En reprenant les résultats de recherches sur la modélisation des actions et définition des opérateurs (Tidafi, 1996, De Paoli, 1997), j'ai extrait un devis descriptif sur la description de la visibilité par Vitruve que nous utilisons comme outil de recherche. Par la suite, j'ai procédé à des exemples de projection. Ces exemples peuvent se comparer à des esquisses, ils sont du côté géométrique encore «incomplets» et ils peuvent manquer de données précises. La dernière étape présente le «discours» procédural. Il s'agit ici de produire, à la lecture de textes de l'encyclopédie discursive des maquettes procédurales, des fonctions qui puissent s'affranchir des données géométriques pour intégrer des opérateurs de contrôle géométrique et sémantique.

Ces images sont le résultat de l'interprétation des performances ou des qualités du théâtre par des maquettes procédurales qui présentent des étapes qui sont encore dans une phase d'exploration de la solution. Ces maquettes doivent composer avec des «variables» qui demandent que l'étape de formulation d'une solution soit complétée pour permettre la visualisation. Ce sera le concepteur qui décidera quels opérateurs sémantiques auront préséance sur l'autre pour optimiser, selon la «culture» de l'architecte et les «connaissances» (fonctions) de la machine, le résultat à atteindre.

Cette modélisation permet d'ajouter à la description géométrique du théâtre de Vitruve des fonctions non modélisables par le dessin mais modélisables par un langage fonctionnel qui permet d'intégrer les processus de construction. Les acteurs peuvent participer activement à la modélisation.

Tableau C

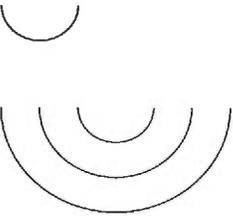
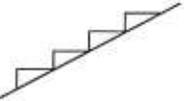
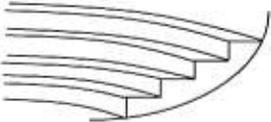
Devis descriptif	Projetation	Le discours procédural
Outil : texte écrit extrait de <i>De Architectura</i> (Vitruve)	Outil : programme de modélisation par primitives géométriques	Outil : programme de modélisation par primitives géométriques et opérateurs
<p>...Il ne faut pas croire que les mêmes proportions puissent servir à toutes sortes de théâtres...les degrés sur lesquels on place les sièges des spectateurs ne doivent pas avoir moins d'un pied et un palme de hauteur...</p>	<p>Génération de formes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • la forme (gradins) :  <ul style="list-style-type: none"> • répétition de la forme : 	<p>Génération de fonctions:</p> <ul style="list-style-type: none"> • la fonction de la pente : (<i>define (pente)</i> (<i>algorithme qui génère des points</i>) (<i>N formes par une série de points</i>)) =>les point sont sur une droite ----- ---- • la fonction de la visibilité: ...(define (<i>visibilité</i>) (<i>relation algorithmique avec la fonction pente</i> <i>modification de l'algorithme qui génère les points</i>)) =>les points peuvent être sur une courbe
<p>l'architecte doit avoir égard à la nature des lieux et à la grandeur de l'édifice pour appliquer les mesures le plus convenables...par exemple, les gradins, les paliers, les balustrades, les chemins, les escaliers, les estrades, les tribunes et autres choses semblables qui, par leur destination particulière, ne sont point assujetties à la proportion générale de l'édifice.... ce qui demande une grande expérience dans l'architecte, pour trouver de nouveaux expédients quand il en est besoin.</p>	<p>dessin projeté de la pente :</p>  <p>Résultat :</p> <ul style="list-style-type: none"> • relation linéaire: (équation de premier degré : une droite) • observation passive du concepteur ; la forme ne peut être que la génération géométrique des données de Vitruve. 	<p>maquette procédurale de la pente:</p>  <p>Résultat :</p> <ul style="list-style-type: none"> • cette modélisation permet d'ajouter à la description des fonctions décrites par Vitruve, mais non modélisables par le dessin; • participation active du concepteur ; la forme peut changer en fonction de la fonction, par exemple en fonction de la visibilité.

Figure 98. Modélisation du processus de la manière de bâtir le théâtre

10.4.1 Mise à l'épreuve de la modélisation des opérateurs (première expérimentation)

Le modèle en architecture a comme but la matérialisation d'une idée par les paramètres qui définissent la complexité du bâtiment. Notre modèle rend opérationnels ces paramètres, appelés opérateurs, par des fonctions. L'opérateur que nous avons pris en considération pour la modélisation est la visibilité.

Le caractère novateur de notre démarche par rapport à la modélisation de la voûte, vient de la possibilité de récupérer les fonctions de la voûte et de les transformer en fonctions du théâtre (d'un coup nous pouvons transférer les techniques de construction, et plus précisément le savoir-faire) et de la possibilité d'encapsuler un double paramétrage des fonctions pour traiter les prototypes du bâtiment avec leur complexité dès le départ, comme illustré dans les tableaux D et E. (Figures 99 et 100)

Le tableau D présente un exemple de définition de ces paramètres par l'utilisation du dialecte *Scheme* et des fonctions de visualisation du logiciel SGDL. Cette procédure permet de ne pas se lier à des fonctions qui pourraient à première vue paraître déterministes, c'est-à-dire qui produisent une et une seule solution. Par exemple, la transformation algorithmique de la fonction visibilité permet de définir la position de sièges pour des adultes, mais elle pourrait aussi bien représenter, par la modification des paramètres, la position des sièges pour des enfants ou encore définir une position optimale pour la visibilité d'un écran de cinéma.

Le tableau E présente des exemples de figuration de la maquette procédurale du théâtre où nous avons imbriqué l'opérateur sémantique (la visibilité) et les opérateurs géométriques et où nous avons procédé à des essais de conception par la modélisation des opérateurs et des actions.

Tableau D

Définition des paramètres de conception

<pre>(define centrum (vector 0 0 0 1)) (define primo 10) (define ultimo (+ primo (* nombre-sieges d-siege))) (define rapport-vitruve (/ 2 4)) (define nombre-sieges 20) (define d-siege 1)</pre>	Description des paramètres de Vitruve
<pre>(define h-scène 2) (define d-scène 4) (define front .4) (define corps-assis 1)</pre>	Description des paramètres par l'ajout d'une nouvelle fonction : la visibilité

Transformation algorithmique de la fonction visibilité

	<p>Transformation algorithmique de la fonction Visibilité (position des sièges et des spectateurs) :</p> $hk+1 = \frac{hk + \text{corpassis} + \text{front} - \text{h-scène}}{\text{d-scène} + ((k - 1) * \text{d-siège})}$
--	---

Exemple de deux instances du modèle procédural, par un langage fonctionnel (images 2 et 8 du Tableau E)

<pre>(define M-theatre-vitruve (Dluni (coord_xyz .1) (Dlint (M-gradenes-Vitruve 10) M-forme-vitruve)))</pre>	Description fonctionnelle du théâtre avec les opérateurs définis par Vitruve. Pour un ensemble de 10 sièges et selon le plan de théâtre.
<pre>(define M-theatre-vue (Dluni (coord_xyz .1) (Dlint (M-gradenes-vue20) M-forme-vitruve)))</pre>	Description fonctionnelle de l'opérateur sémantique Visibilité. Description fonctionnelle du théâtre avec les opérateurs définis par Vitruve (20 sièges).

Figure 99. Exemple de définition des paramètres

Tableau E

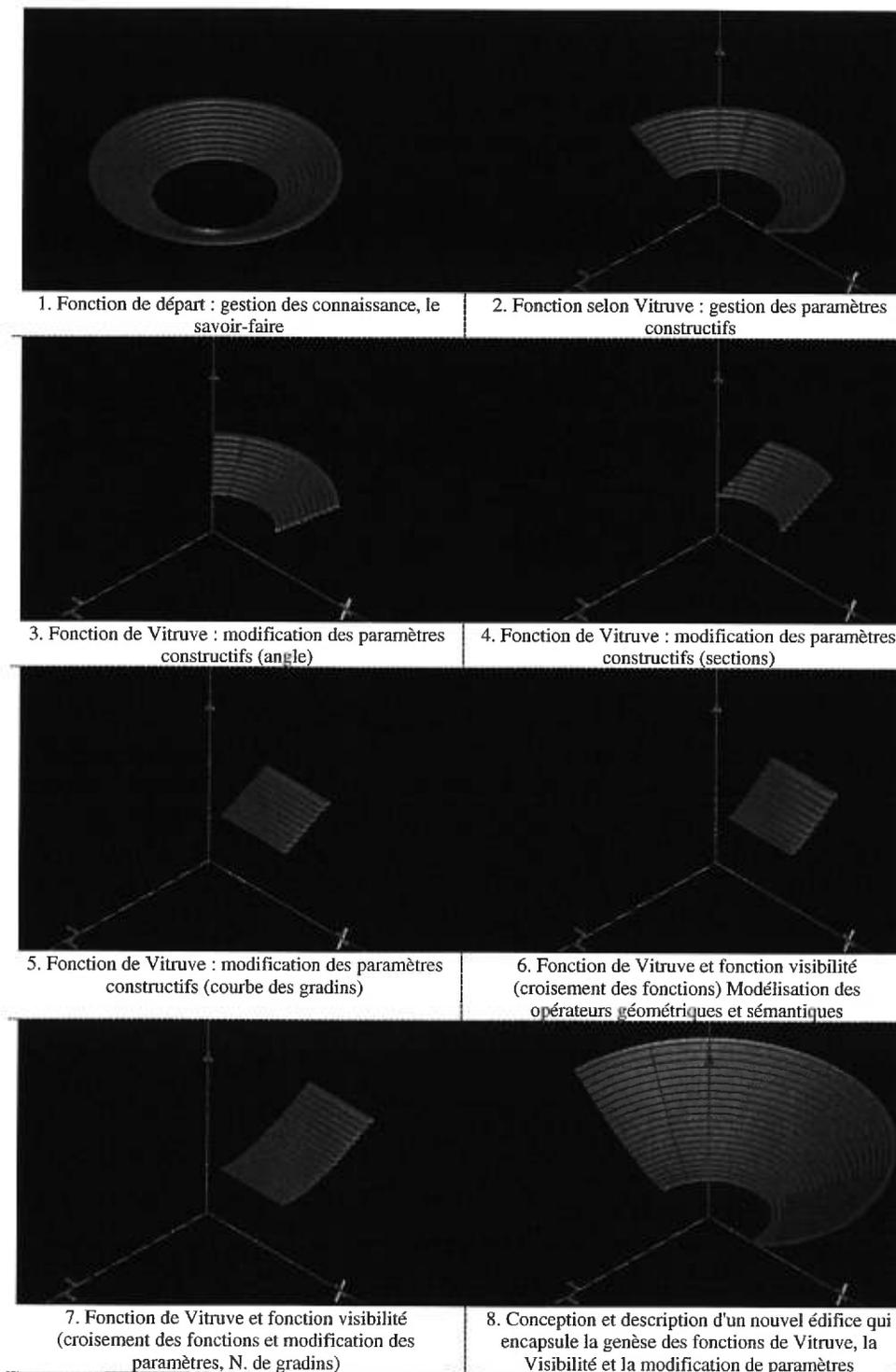


Figure 100. Différentes figurations d'une maquette procédurale (Modélisation des opérateurs et des actions)

10.4.2 Les résultats de la première expérimentation

L'apport scientifique de cette expérience est la compréhension et la validation de l'hypothèse voulant que nous pouvons intervenir, grâce aux outils informatiques, sur des opérateurs qui permettent à l'architecte de se réapproprier une conception complexe du bâtiment par une redéfinition de ses méthodes de travail.

Dans un article sur la modélisation des opérateurs, j'avais conclu que l'utilisation d'une grammaire topique des actions et d'un vocabulaire des opérateurs nous permettait de comprendre les actions des acteurs et d'établir une stratégie pour améliorer les moyens de figuration. (De Paoli, 1997) Les résultats présentés nous permettent d'affirmer que nous pouvons améliorer les moyens de figuration :

- par la compréhension des objets architecturaux ;
- par le biais de leur topologie et de leurs propriétés.

Et que ces objets peuvent être interreliés d'une façon qualitative par une approche sémantique et non seulement géométrique.

Si nous considérons l'architecture comme un ensemble complexe de maquettes procédurales qui matérialisent un ensemble de caractéristiques et de propriétés, nous pouvons, d'un point de vue algorithmique, créer des variables couramment appelées attributs dans la programmation orientée-objet, qui permettront de différencier un objet d'un autre en définissant son apparence, son état. Les variables des propriétés que nous pourrions appeler de comportement, seront modifiées quand l'objet interagira avec un autre. Ce qui signifie que nous pouvons modéliser un ensemble d'actions sur une classe ou un ensemble de propriétés. Comme, par exemple, le changement du profil du théâtre, non seulement en fonction de la forme et des dimensions, mais aussi de la visibilité ou de l'acoustique. Nous pourrions, par exemple, modéliser le plafond de notre théâtre avec une fonction plafond qui tient compte des paramètres quantifiables de Vitruve et d'une fonction qui tient compte de la genèse des plafonds pour les théâtres ainsi que de la forme déterminée par des propriétés (qualités, performances) sémantiques comme l'acoustique. (Figure 101)

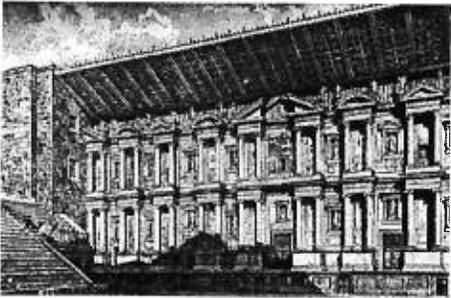
Opérateur géométrique	Opérateur sémantique (acoustique)
<p>La couverture du portique, que l'on élève au-dessus des degrés, doit être de la même hauteur que celle de la scène, parce que la voix qui monte en passant sur l'extrémité des degrés, et qui parvient ainsi jusqu'au haut de ce toit, se perdrait aussitôt qu'elle serait arrivée à l'endroit où il manquerait s'il était placé plus bas. (Vitruve, 1er siècle avant J.-C.)</p>	<p>Le toit du théâtre doit respecter la présence de deux salles de concert....(Le grand théâtre de Québec inauguré en 1971, Victor Prus, architecte)</p>
 <p data-bbox="363 951 824 1003">Le théâtre d'Aspendus Xenon architecte, 2e siècle, d'après G. Niemann</p>	 <p data-bbox="1013 947 1284 1003">Le grand théâtre de Québec Victor Prus, architecte, 1971</p>

Figure 101. Les opérateurs en conception

Ce mécanisme de description est extrêmement puissant, il permet d'établir les relations entre les fonctions que nous pouvons aussi appeler classes, et il permet de conduire à une grande économie de moyens lors de la conception par maquettes procédurales.

10.4.3 Mise à l'épreuve de la modélisation des opérateurs (deuxième expérimentation)

Cette deuxième expérimentation de mise à l'épreuve de la modélisation des opérateurs reprend les conclusions du test précédent, où nous avons imbriqué l'opérateur sémantique (la visibilité) et les opérateurs géométriques et où nous avons procédé à des essais de conception par la modélisation des opérateurs et des actions. Dans cette deuxième expérimentation j'ai voulu exploiter la possibilité d'enrichir les fonctions créées par une nouvelle fonction sémantique et procéder à une figuration qui permette le croisement de deux fonctions conceptuelles, la visibilité et l'acoustique. De cette façon les opérateurs sémantiques interviennent au tout début de la conception et il serviront pour produire des maquettes qui, riches en connaissances, pourront les transférer à des modèles volumique pour la réalisation de l'objet architectural.

Lors d'une étude sur l'acoustique, plusieurs contraintes doivent être prises en considération. En ingénierie, l'acoustique est un domaine très vaste et ce n'est pas le but de l'expérience de tenir compte de toutes les contraintes pour la création de l'algorithme de l'opérateur sémantique que nous allons modéliser. Il est quand même important de souligner qu'en architecture, les bruits et les vibrations mécaniques sont presque toujours à l'origine de graves perturbations et ils posent souvent des problèmes très difficiles à résoudre, surtout *a posteriori*. (Lehmann, 1961)

Pour l'expérience, nous avons choisi de traiter, parmi les notions d'acoustique, celle de temps de réverbération vers le premier et le dernier spectateur de l'estrade. (Figure 102) La réverbération est basée sur des connaissances des lois qui régissent la propagation des ondes sonores et elle pose des problèmes mathématiques souvent très difficiles à résoudre. Selon Lehmann (1961), «c'est surtout une étude expérimentale qui a permis d'édicter certaines règles générales relatives à la réverbération du son dans les salles», (p. 99) ce qui permet de voir cette expérience d'une façon encore plus utile.

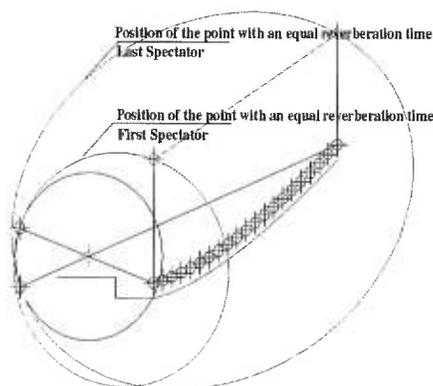


Figure 102. Transformation algorithmique de la propriété sémantique acoustique (De Paoli et Bogdan, CAAD Futures99, 1999)

Les modèles précédents étaient produits par des algorithmes qui transféraient le savoir-faire et imbriquaient certains paramètres géométriques et sémantiques. Dans cette dernière expérience, je présente le résultat final des recherches qui est la figuration de maquettes procédurales possédant seulement des propriétés sémantiques (propriétés et performances du bâtiment) et je montre que le croisement de ces deux opérateurs permet plusieurs simulations qui aident au concepteur dans ses choix conceptuels.

La caractéristique de ces modèles est de constituer des scènes qui, comme dans les expériences présentées dans les recherches sur la conception déclarative, permettent une analyse causal-probabiliste par des modèles non clairement définis. Ces modèles, étant basés uniquement sur des opérateurs sémantiques, ne sont plus dans la figuration le théâtre de Vitruve, mais des modèles qui expriment une sémantique. Ils pourraient être le modèle d'une piscine couverte, d'un cinéma ou un stade ou, pourquoi pas, l'ensemble de fonctions pour définir les paramètres de visibilité et acoustique de l'hôtel de la nouvelle station spatiale qui sera d'ici quelques années une destination de choix pour touristes curieux de «voir». ¹ (Figure 103)

¹ «L'idée d'installer en permanence une station habitée autour de la terre, proposée par Constantin Tsiolkovski au début du siècle a été reprise ensuite par la plupart des grands précurseurs de la conquête de l'espace. Dans leur esprit une station spatiale est avant tout un camp de base sur la route des astres du système solaire. L'exploration humaine du système solaire se fera à partir des stations spatiales. En outre, celles-ci peuvent servir à bien d'autres tâches, comme l'observation de la terre et des astres». (<http://space.decollage.org/fra/Html/011.htm>)

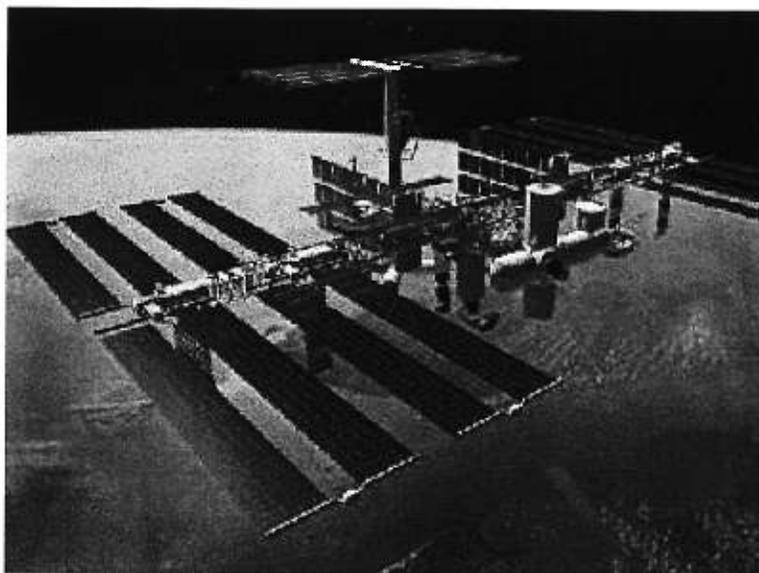


Figure 103. Station spatiale (Bibliothèque numérique de la NASA, É.-U.)

La figure 104 présente un exemple de définition d'opérateurs sémantiques : la visibilité et l'acoustique par l'utilisation du dialecte *Scheme* et des fonctions de visualisation du logiciel SGDL.

La Figure 105 présente des exemples de figuration de la maquette procédurale du théâtre où nous avons imbriqué l'opérateur sémantique visibilité et celui de l'acoustique et où nous avons procédé à des essais de conception par la modélisation des opérateurs sémantiques.

«Des vacances dans l'espace dès le début du siècle prochain?», c'est ainsi que la Presse titrait en 1997 un article sur les évolutions spatiales : «Les premiers touristes de l'espace pourront prendre leurs vacances en orbite dès le début du siècle prochain, ont estimé des responsables de principales agences spatiales réunis il y a quelques temps à Brême. Les plans de construction du premier hôtel de l'espace sont déjà conçus dans les moindres détails ; l'industrie de haute technologie japonaise, conduite par (le numéro un du BTP japonais) Shimizu, n'attend plus que le feu vert, a affirmé Hartmuth Mueller, de la première agence cosmique allemande Space-Tour».

Exemple de définition des méta-fonctions

<pre>(define visibility (lambda (view_angle) (m-relation (geometry (space)) (dimensions (spectators))))))</pre>	Visibilité
<pre>(define acoustics (lambda (reverberation-time) (m-relation sound_source (spectators_position (visibility))))))</pre>	Acoustique

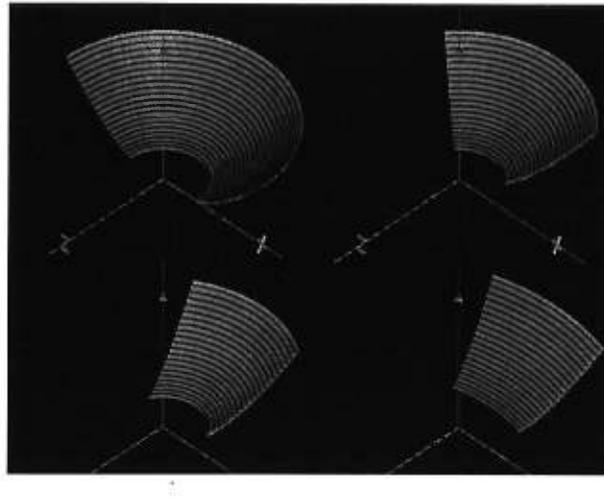


Figure 104. Exemples d'instances du modèle procédural (figuratif et fonctionnel) obtenues par l'interaction avec les paramètres géométriques (rappel de la première expérience)

<pre>(define theatre (lambda reverberation_time visibility_comfort) (Dluni (platform_seats (visibility_comfort) (roof (position_seats (visibility_comfort)) (reverberation_time))))))</pre>	<p>Par la modification du confort de la Visibilité on obtient une nouvelle figuration pour les sièges et, par conséquent, une nouvelle position pour la toiture, qui a été «reliée» à la position des gradins et au temps de réverbération (acoustique)</p>
<p>Exemple d'interprétation sémantique de la maquette procédurale : Visibilité et Acoustique</p>	

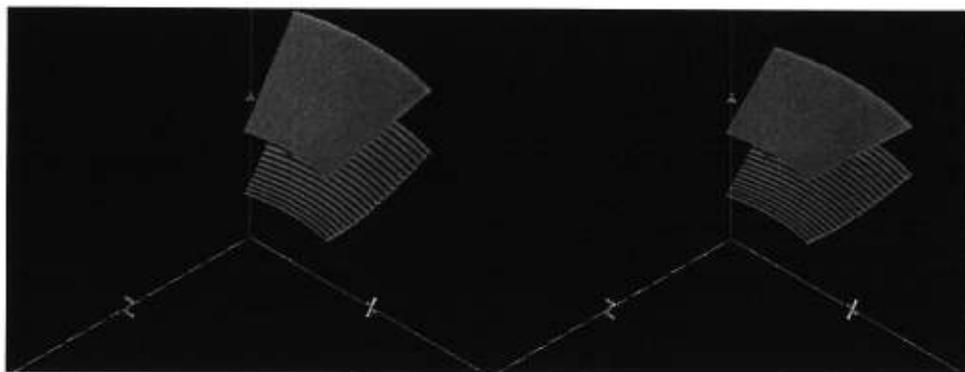


Figure 105. Exemples d'instances du modèle procédural (figuratif et fonctionnel) obtenues par l'interaction entre les opérateurs sémantiques (deuxième expérience)

10.4.4 Les résultats de la deuxième expérimentation

Pour les travaux d'expérimentation sur le modèle du théâtre de Vitruve, nous avons utilisé les fonctions du logiciel SGDL dont les résultats sont des images de synthèse qui donnent un rendu volumique. Ce logiciel a permis de visualiser les données et de modéliser facilement des formes simples, ce qui était le but de l'expérience.

C'est ainsi que s'opère le lien entre le fonctionnel et l'opérationnel. Dans sa description du théâtre, Vitruve a présenté des critères de construction : le volume, son emplacement, le climat et sa beauté. Ce sont les paramètres de construction. Nous avons montré qu'il est possible d'ajouter à ces paramètres des nouvelles fonctions, comme la visibilité de la scène pour chacun des spectateurs. Par le biais d'une approche fonctionnelle nous pouvons définir des fonctions comme l'héritage, le savoir-faire et les imbriquer avec de nouveaux opérateurs comme la visibilité ou l'acoustique pour définir une maquette procédurale qui servira d'aide à la conception. De plus, nous pouvons, mathématiquement, profiter des fonctions déjà générées pour d'autres méthodes constructives et les insérer dans un nouveau processus de construction. Finalement, le fonctionnel se lie à l'opérationnel avec ce double paramétrage qui nous donne avec quelques lignes de programmation une définition qui comprend la complexité non seulement morphologique du bâtiment, mais aussi la complexité de son processus de conception.

Aujourd'hui, l'informatique nous donne la possibilité de transformer une description en fonction (finalement la fonction remplace l'écriture) et elle nous permet de découper la fonction en sous-fonctions, comme dans le discours et les phrases du discours. Par exemple, dans le cas du théâtre, nous avons les fonctions gradins et angles, fonctions que nous pouvons, en rappelant le vocabulaire de la programmation orientée-objet, appeler des modules.

Cette approche permet la construction d'un modèle volumique en ajoutant une dimension nouvelle qui est constituée de tous les événements de la construction et qui permet de produire un modèle en fonction de paramètres particuliers que nous appelons fonctions génériques paramétrées. (Parisel, 1998) Et dans le cas de cette deuxième expérience sur le théâtre, l'outil informatique a permis d'ajouter à la description géométrique du théâtre de Vitruve une nouvelle description ses opérateurs uniquement

sémantiques qui donnent à l'architecte cette latitude dans la conception que les simples lignes et points géométriques avaient proscrite.

Nous pouvons finalement naviguer à travers les propriétés de l'objet à concevoir : la lumière, l'acoustique, l'harmonie, tel que suggéré par Vitruve, et nous pouvons explorer notre objet jusqu'à sa réalisation en gardant non seulement la genèse constructive du modèle, mais aussi ses propriétés conceptuelles. Nous retrouvons ainsi la signification étymologique du symbole : *Symbolum* qui, comme je l'ai déjà souligné, représentait un objet en argile, cassé en deux morceaux par l'hôte de la maison lors du départ de son invité et qui transmis dans le temps permettait, une fois les parties rassemblées, de donner une preuve des relations entre les propriétaires des deux morceaux.

Contrairement à Vitruve qui ne pouvait attribuer au projet que des paramètres fixes, l'outil informatique permet aujourd'hui de créer une fonction qui évolue nous permettant de créer des nouveaux modèles qui pourront être représentés d'une manière complètement différente du modèle de départ, ce qui est totalement novateur, tout en gardant les mêmes propriétés conceptuelles.

Conclusion

L'adoption de l'ordinateur par les architectes passe par des recherches orientées vers des systèmes qui manipulent en même temps la connaissance, les propriétés géométriques et sémantiques de la scène et aussi par des recherches sur le processus de conception lui-même. Ces nouveaux systèmes seront basés sur des langages de haut niveau caractérisés par un raisonnement de type déductif (déductions, enlèvements), et sur l'utilisation d'une approche par modèles (scènes) plutôt que par calcul numérique. Pour rendre le processus de conception par ordinateur plus explicite et plus transparent. (Popova, De Paoli, 1998) Avec cette approche, le modèle n'est pas le résultat d'une solution, ni d'une liste de fonctions, mais le résultat d'une activité dialectique, où les opérateurs sont les «vérificateurs» de l'idée architecturale.

Cette nouvelle approche montre comment on peut utiliser l'ordinateur dans le

processus de conception et de réalisation du projet. Le concepteur peut remettre en question ses interprétations cognitives par de nouvelles interactions, à tout moment et tout au long du processus de conception-réalisation du modèle. Ces interprétations-interactions sont structurantes : elles interprètent le modèle en structurant la forme. Cette rétroaction se fait à travers une action sur l'environnement et la confirmation de la structure suggérée. La forme ne peut pas être exacte et précise, parce que l'environnement évolue. Elle constitue finalement un ensemble de prédictions, comme l'est un croquis préliminaire dessiné par l'architecte sur une serviette de papier pendant une discussion avec le client. Cette approche ajoute aussi une nouvelle dimension ou possibilité, la participation active et simultanée de tous les acteurs au processus de conception.

Le mécanisme de mise à jour des «prédictions» rappelle le raisonnement abductif (Bourguin, 1989) qui consiste à faire émerger une nouvelle hypothèse plausible aussitôt qu'un phénomène observé est différent de celui qui était attendu: nous interprétons l'anomalie et nous présentons une nouvelle solution. Cette méthode est à la base de la conception en architecture définie par le concept de représentation des propriétés que j'ai appelées sémantiques.

Les recherches sur la conception déclarative réalisées avec le groupe de travail du département d'informatique de Poitiers nous ont amenés à une série de conclusions sur les outils disponibles et de propositions pour de nouvelles recherches orientées vers le développement d'une plate-forme de conception intelligente qui puisse incorporer une modélisation des processus d'actions et des opérateurs. Cette plate-forme doit être généralisable à d'autres domaines que l'architecture ou, comme on a pris l'habitude de les appeler, aux sciences de la conception.

La production des images de synthèse concerne des disciplines de plus en plus diversifiées avec des exigences de plus en plus grandes de validation, de qualité et de coût de production des scènes tridimensionnelles. La visualisation, la compréhension et la mise à contribution d'une scène pour un objectif donné sont possibles grâce aux caractéristiques de la géométrie du modèle mais aussi de l'organisation de ses unités, obtenue par différentes techniques de modélisation.

J'ai déjà souligné qu'en termes informatiques, il y a trois courants principaux pour la modélisation, basés sur une approche impérative, déclarative ou fonctionnelle. Le

premier courant implique une séquence d'exécution d'opérations de calcul, le second ne fixe que les buts à atteindre et le troisième s'intéresse à la façon d'obtenir un résultat. Les approches actuelles en synthèse d'images, qualifiées d'impératives, sont souvent inefficaces mais surtout trop éloignées du mode de pensée intuitif habituel d'un concepteur, puisqu'elles correspondent aux séquences des tâches exécutées par un ordinateur.

Une modélisation est fonction des possibilités offertes par le modelleur géométrique utilisé. Cependant, bien que chaque modelleur possède ses caractéristiques spécifiques, on peut constater des problèmes communs aux modelleurs qui ont trait aux manipulations de la topologie et de la géométrie d'une scène au moment de la conception. Tous les modelleurs géométriques, à un degré ou à un autre, fournissent une aide significative lors du processus global de conception, d'où la tendance à les appeler systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO). Mais en réalité, la plupart de ces outils dits de CAO ne participent qu'à une courte phase du processus global de conception : création, visualisation et manipulation formelle du modèle géométrique de l'ensemble des objets d'une scène. On devrait donc les appeler plus modestement outils de CGAO ou conception géométrique assistée par ordinateur.

Les premières hypothèses quant aux limitations et aux défis à relever, qui se sont dégagées de l'analyse des résultats des travaux de recherche réalisés en CAO à ce jour, ont rapidement mis en cause la complexité de ce qu'il est convenu d'appeler un processus de conception. Ainsi, il est possible de constater que :

- la conception ne peut être considérée comme une méthode de résolution de problèmes ;
- l'ensemble des exigences élémentaires que doit respecter un complexe d'objets 3D ne peut être défini *a priori*, avant le début d'un processus de conception ;
- la méthode de travail d'un concepteur est basée sur une formulation / résolution de problèmes itérative mais aussi récursive ;
- la génération d'une solution à un problème de conception ne se résume pas à un problème quantitatif et combinatoire qui peut être représenté par le biais d'une matrice d'interactions entre exigences ;
- les outils de CAO ne permettent pas la manipulation de définitions d'objets incomplètes ;

- la prise en charge de multi-représentations et multi-configurations de complexes d'objets n'est pas possible alors qu'elle est nécessaire et indispensable à la conception ;
- les outils de CAO sont trop lourds à manipuler et pas suffisamment commodes pour manipuler des objets complexes d'une scène tridimensionnelle ;
- la plupart des travaux de recherche relatifs à la modélisation informatique s'intéressent aux résultats d'un processus de conception et négligent les savoirs et les savoir-faire impliqués dans ce processus ;
- les études consacrées aux connaissances spatiales se heurtent à la grande difficulté d'appréhender et de maîtriser ces connaissances.

Les recherches actuelles en conception vont dans plusieurs directions, mais l'approche que je considère la plus prometteuse est celle qui s'intéresse à la fois à la représentation et à la manipulation des connaissances relatives à des «objets-but» d'un processus de conception, et à l'intégration des savoirs et des savoir-faire présents pendant ce processus. Il s'agit du développement de nouveaux systèmes capables de mémoriser des connaissances relatives à des méthodologies de conception expérimentées et à des re-conceptions d'objets existants pour les appliquer à de nouveaux objets.

Actuellement, des approches novatrices sont développées sur la base de nouveaux concepts théoriques et des outils de modélisation de nouvelle génération. Ces nouvelles approches sont souvent issues de recherches menées d'abord dans d'autres domaines que celui de l'intelligence artificielle, comme la biologie, l'architecture ou la physique. Toutes ces nouvelles approches se caractérisent par une remise en cause plus ou moins profonde des présupposés de l'intelligence artificielle telle qu'elle a été définie à ses débuts.

Nous avons constaté qu'un grand pas reste à franchir afin de passer des outils de CAO géométriques à des systèmes d'aide à la conception intelligente manipulant non plus des objets et des contraintes géométriques, mais plutôt des propriétés conceptuelles ou des savoir-faire par des opérateurs sémantiques et géométriques.

Enfin, ce type d'approche veut proposer, comme le souligne Ganascia (1997), «une mise en discussion des divisions disciplinaires traditionnelles, en éliminant une fois pour toutes le caractère exclusif de la distinction entre matières littéraires et

scientifiques». (Figure 106) Parce que les spécialisations du savoir ne doivent pas amener à un enseignement plus pratique ou technique, mais doivent amener à anticiper les changements qui enrichiront le savoir de demain.



Figure 106. Raphaël Sanzio, détail de la fresque L'école d'Athènes¹ (1509-1514), Musée du Vatican, Rome
(Photo G. De Paoli, 1998)

¹ Alors que Platon se tient un index pointé vers le ciel, son élève, Aristote, a la paume de la main tournée vers le sol. C'est ainsi que Raphaël oppose les préoccupations métaphysiques de Platon, à la méthode scientifique prônée par Aristote (Rencontres philosophiques de l'UNESCO, 1996)

CONCLUSION GÉNÉRALE

Parler d'architecture signifie en premier lieu parler de conception, d'idée, d'image, de symbole, de l'être humain, nous rappelait B. Zevi (1959). L'architecte, pour décrire l'architecture, fait appel dès le début de la conception à des modèles, informatiques ou non, et qu'il utilise l'ordinateur ou non, il essaye de décrire, d'une façon plus ou moins complète, la réalité. Il s'agit donc de la description d'un phénomène ou d'un objet par ses caractéristiques géométriques et par ses caractéristiques physiques, et le modèle est le résultat des actions d'opérateurs géométriques (la forme), physiques (les contraintes) et sémantiques. Ces modèles contiennent et le processus de genèse du bâtiment et les approches conceptuelles et constructives. À ce propos, J.A. Granath (1991), dans sa thèse sur *L'architecture, la technologie et les facteurs humains*, nous rappelle que le terme architecture a plusieurs significations différentes : de la conception du bâtiment à sa construction et à son environnement, jusqu'au style et à la manière de faire et, dans un sens large, le terme architecture peut être utilisé comme synonyme de système, ordre et organisation.

Selon C. Parisel et T. Tidafi, «En architecture, la complexité de l'objet à concevoir et son coût de production font que les architectes travaillent principalement sur un modèle du bâtiment projeté de façon à en évaluer les caractéristiques et les performances avant sa réalisation». (1998) Ce modèle, avant la Renaissance, faisait appel à un ensemble de règles naturelles et de savoir-faire, comme l'illustre déjà Vitruve, dans ses *Dix livres sur l'architecture*. Et cet ensemble suivait dès le début de la conception les acteurs de ce processus en se modifiant au fur et à mesure jusqu'à la réalisation de l'œuvre. C'est autour du XVI^e siècle que les livres comme ceux de Vitruve, par exemple, ont commencé à être accompagnés de dessins et que le modèle ainsi que le «discours» qui l'accompagnait et qui exprimait les règles naturelles, la sémantique du pourquoi, ont commencé à disparaître au profit de dessins, mécanistes et précis qui tout en essayant de représenter exactement le modèle, se confrontaient à la complexité du bâtiment. Ces dessins, encore aujourd'hui, n'ont pas pu atteindre la précision voulue, ils sont redondants et ils ne peuvent pas exprimer les liens dialectiques entre les différents objets architecturaux tant qu'ils sont remaniés continuellement sur chantier jusqu'à la fin des travaux.

Plusieurs efforts, en particulier après la deuxième guerre mondiale, suivant le courant du fordisme et de l'industrialisation du processus de construction, ont amélioré ce qu'on appelle le processus décisionnel et, avec le traitement des données par des systèmes experts, ont proposé des solutions nouvelles pour la gestion du bâtiment. C. Davidson et al. , dans un article sur les systèmes experts et l'utilisation de l'information pendant la conception et la construction du bâtiment, rappellent que tout au long du processus du projet, nous retrouvons une situation où les décisions sont prises dans un état d'incertitude et d'interdépendance. Les auteurs soulignent aussi que le *project file* continue d'augmenter en volume et en information depuis et tout au long du processus de projet. Ce fichier du projet doit comprendre toute l'information accumulée sur les données graphiques et non graphiques : «*starting from the accumulate experience of the involved parties...The accumulation process is part of the design and development process*». (1988, p. 107)

Comme le souligne Y. Kalay, la conception en architecture se distingue des autres processus de résolution de problèmes par deux caractéristiques majeures : l'état des solutions présentées doit être généré avant qu'il puisse être évalué et l'heuristique qui guide la recherche relie non seulement l'information interne d'un problème particulier, mais aussi l'information qui lui est externe, comme par exemple, les normes culturelles et les styles. (1985, pp. 319-328) Cette dernière information est celle qui permet aux opérateurs sémantiques d'opérer et de créer un pont entre des méta-modèles pour réaliser celui qui sera adopté, modifié et construit.

L'informatique prend sa place dans ce processus en devenant une discipline dont le but est fédératif. Elle permet l'indépendance des choix tout en gardant les liens créés par le «discours» créatif sur l'objet architectural. Cette vision nouvelle de l'informatique dans les sciences de la conception permet à l'ordinateur de traiter l'information pour représenter non seulement un savoir-faire, qui aide à des choix éclairés lors de la définition du bâtiment, mais surtout pour permettre à l'architecte de créer lui-même le discours qui sera traité par l'ordinateur, parce qu'il pourra intervenir dès le début de la phase de conception. Ce qui contribue à un changement de paradigme, dans une nouvelle vision de la représentation architecturale, par un nouveau langage comme le soulignait J.F. Ribas dans la préface du livre sur le *Dessin d'architecture par ordinateur*, que j'ai écrit en 1992 :

«Les dessins de l'architecte, c'est de l'information. Wright dessinait avec des crayons de couleur. Il disait que le flou artistique montre mieux l'architecture. Le Corbusier refusait les traits incertains, il les voulait précis, des épures et à l'encre. Il disait que c'était la seule façon, pour lui, de «lire l'imaginaire».

Léonard a écrit : «Toute ma vie j'ai essayé de peindre le volume» et Michel-Ange signait ses peintures «Michelangelo, sculpteur».

Le métier d'architecture est une patiente tentative de voir. Représenter, afin de voir. Nous vivons continuellement au conditionnel : «si c'était ainsi, comment serait-ce? [...] les plans vont disparaître un jour, parce que cet outil qu'on appelle l'informatique — et qui, bien obligé, fait pour le moment des «sorties», des productions sur papier traditionnel — ne cesse d'évoluer. Il a sa propre logique : lui, il travaille en trois dimensions. Bientôt, sur un chantier, deux lasers croisés dessineront dans l'air la poutre à construire. Hologramme à travers quoi nous pourrions passer. Le virtuel devenu visible.» (Ribas, 1992, p. iv ; De Paoli, 1992)

Comme le soulignent volontiers les architectes, pour illustrer le travail de l'architecte, en racontant l'histoire du Calife qui voulut se faire construire un merveilleux palais : il fit venir un bâtisseur et lui demanda un plan. Comment voulez-vous, lumière de l'Orient, que je vous montre le plan de ce qui n'existe pas encore? (De Paoli et Pellissier, 1992)

J'ai introduit le mot «discours» pour exprimer la figuration architecturale et le mot «encyclopédie» pour proposer un archivage des maquettes procédurales. Je trouve ces termes plus complets et mieux adaptés aux langages de communication utilisés pour la modélisation, qu'elle soit théorique, géométrique ou sémantique. P Ceccarini, dans la présentation des travaux de D. G. Emmerich dit ceci :

«À la base de toute formulation modélisante se trouve la langue : elle détermine la pensée. Le langage structural mathématique, puisant dans le monde de l'imaginaire, puise avant tout dans la morphologie de la langue : il faut donc considérer cette dernière comme une hyper-forme [...] La langue est une «infrastructure» à elle seule, qui produit la forme de la pensée et que l'on ne saurait négliger car elle est intrinsèque au phénomène architectural.» (1997, p. 73-74)

Le «discours» procédural, une fois interprété par l'ordinateur, permettra aux opérateurs d'agir et de faire des préfigurations, des esquisses diraient les architectes du passé, et une fois choisies ces esquisses pourront transmettre des connaissances aux modèles constructifs. Ces connaissances souvent oubliées qui, pour paraphraser C.G. Jung parlant de rêves dans son essai d'exploration de l'inconscient, sont des signaux qui

parviennent de l'inconscient, de la «psyché» de l'homme, qui encore aujourd'hui jouit de peu de considération : «ce n'est que psychologique» signifie trop souvent «ce n'est rien». (1964, p. 180)

Et, comme le souligne U. Eco (1999) dans *Kant et l'ornithorynque*, si nous cherchons à comparer nos processus cognitifs au fonctionnement d'un ordinateur, nous pouvons dire que nous percevons les choses comme des ensembles de propriétés et que nous construisons des fichiers pour reconnaître ou identifier les choses : «Lorsque le fichier commence à se définir, sur la base de jugements de similarités ou de différences, on décide de l'intégrer dans un dossier donné». (p. 236) Mais cette analogie à l'informatique comporte une embûche : dans l'ordinateur, les fichiers sont «pleins», alors que les dossiers sont vides en ce sens que sans les fichiers les dossiers ne contiennent pas d'information. Finalement nous pouvons assimiler l'analogie entre dossiers et fichiers à l'analogie entre dictionnaire et encyclopédie, c'est-à-dire entre connaissance catégorielle et connaissance par propriétés, et souligner que la compétence encyclopédique ne se limite pas à répertorier comme c'est le cas du dictionnaire.

Ce constat est celui auquel j'arrive dans mes conclusions : pour permettre à l'architecte de s'approprier l'outil informatique, nous ne pouvons pas nous contenter de lui proposer l'informatique comme un outil qui gère d'une façon catégorielle, mais nous devons, comme le souligne mon hypothèse de travail, comprendre que la pleine exploitation de la relation concepteur-ordinateur va de pair avec un changement radical du langage pour la figuration.

• **Discussion des résultats et pistes de développement**

La fonction de la recherche et de l'expérimentation consiste à faire ressortir des variables et à faire la preuve de l'existence de relations entre elles. Selon A. Ouellet, lors de l'expérimentation, nous devons tenir compte non seulement des relations fonctionnelles entre les variables étudiées, mais aussi d'un contrôle systématique des variables à l'étude, et généraliser cette expérience en dehors du contexte expérimental. (1981) Cette notion de contrôle est particulièrement importante et comme le souligne D.J. Fox, c'est «en contrôlant tous les obstacles que le chercheur parvient à faire la preuve de ce qu'il a postulé dans son hypothèse de recherche». (1969, pp.455-456) Ce

contrôle est influencé par plusieurs obstacles liés aux techniques d'échantillonnage, à la cueillette des données, à la création d'une situation artificielle pendant un test expérimental et à d'autres choses encore.

C'est à la lumière de ces considérations que j'ai opté, après une revue de littérature sur la conception et l'architecture, pour une étude de cas sur les méthodes de travail des architectes et sur l'adoption de l'outil informatique en architecture, afin de corroborer certaines intuitions. J'ai voulu prendre en considération l'humain pour comprendre que la perception en architecture est riche en sensibilité, en sémantique. Voir et penser sont-ils vraiment distincts ?

Il est temps de poser de nouvelles questions, de trouver de nouveaux concepts sur lesquels fonder l'architecture de demain. Ainsi A. Farel (1991, p. 186) répond au débat du fonctionnalisme par rapport au formalisme en rappelant les travaux de B. Tschumi pour le parc de la Villette à Paris :

«Une de nos ambitions est d'exploser certaines définitions de l'architecture, de déconstruire celle-ci et de la reconstruire selon d'autres axes, de considérer que le *mouvement, objet et événement* font inévitablement partie de la définition *a minima* de l'architecture, et que la disjonction contemporaine entre usage, forme et valeurs sociales, suggère que ces catégories architecturales de mouvement, objet et événement sont interchangeables. Considérer l'architecture comme le rapport conflictuel entre l'objet, le mouvement et l'action nous sépare des théories usuelles de référence, qu'elles soient fonctionnalistes ou formalistes, classiques ou modernistes.» (1991, pp. 186-187)

Dans une entrevue de C. Duplay avec Aymeric Zublena, concepteur du Stade de France en 1998 (Figure 107), l'architecte qui fut aussi enseignant à l'École d'architecture de Paris-Villemin répond ainsi à la question sur le rôle et l'importance de l'informatique dans la conception, l'élaboration, la présentation du projet du Stade :

«Pour résumer, je dirais que l'informatique a été juste un outil, mais un outil extrêmement performant. À plusieurs reprises, nous nous sommes dit qu'avec des outils traditionnels, nous n'aurions probablement pas pu produire aussi rapidement les plans et surtout nous n'aurions pas pu calculer aussi précisément, et à de nombreuses reprises, les courbes de visibilité du stade. Je suis catégorique là-dessus [...] Pour cet usage, l'ordinateur a été véritablement indispensable.» (Duplay, 1998, p. 22)

Et à la question sur le temps qu'il passe devant l'ordinateur lors de l'étude d'un projet il ajoute :

«Après les croquis [...]

C'est très variable [...] Maintenant on peut faire beaucoup de 3D. Personne ne court-circuite la phase croquis, mais elle est plus ou moins longue, et je constate qu'assez vite on vérifie [...] un certain nombre d'options, aussi bien spatiales qu'en 2D [...] Le problème, c'est qu'on est obligé de dimensionner (CD) [...] C'est aussi la grande critique que je fais à l'ordinateur. Au stade de l'esquisse de concours, c'est un matériel trop lourd...» (Duplay, 1998, p. 24)

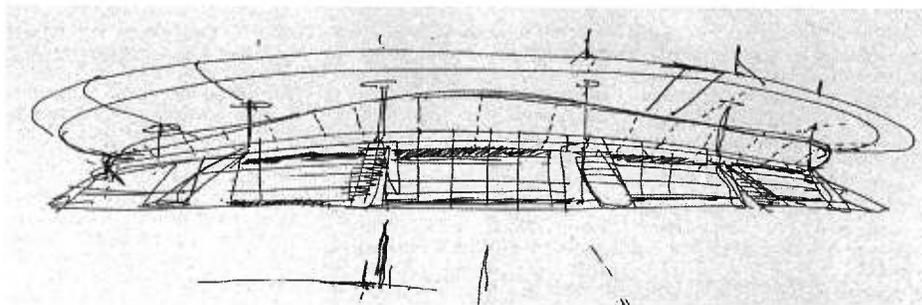


Figure 107. Le stade de France de la main à la machine, entrevue de C. Dupuis avec A. Zubiena 1998

Ces quelques lignes d'entrevue font ressortir encore une fois et clairement les résultats des recherches sur les méthodes de travail de l'architecte et sur l'adoption de l'outil informatique et elles corroborent les blocages identifiés dans la deuxième partie de cette thèse :

- le premier, lié à la structure même des programmes informatiques et du processus de conception ;

- le deuxième, lié à l'outil de travail utilisé, la représentation symbolique sur papier ou sur écran.

Mes recherches ont permis d'identifier parmi les causes des blocages, la gestion des opérateurs qui gouvernent les méthodes de travail des architectes avec l'outil informatiques, que j'ai regroupé sous trois grandes catégories : les opérateurs géométriques ou visibles, les opérateurs sémantiques ou invisibles et les opérateurs de transformation. J'ai dédié mon travail aux opérateurs sémantiques.

La recherche sur la structure des langages informatiques a confirmé mon intuition de départ en reconnaissant l'importance d'avoir un langage de communication qui dépasse le concept de grammaire et de représentation graphique, et qui permette la figuration de l'objet architectural par un «discours» logique «lu» par l'ordinateur. Ce discours logique doit exister dès le début du processus de conception, pour permettre, par une approche de type heuristique, l'enrichissement des connaissances et leur transfert à tous les instants du processus du projet en architecture.

L'outil de travail, dans cette première phase de la conception, doit pouvoir manipuler la géométrie d'une façon intuitive, comme le soulignait déjà à la fin des années cinquante, E. Castelnuovo, en présentant une méthode d'enseignement de la géométrie intuitive par l'étude de l'objet et de l'action :

«La géométrie, telle que nous la présentons dans les cours traditionnels, apparaît comme quelque chose d'absolu, un assemblage de vérités indépendantes de l'activité humaine. Cette conception, encore platonique, est certainement en opposition avec la signification actuelle du terme «intuition». Tandis que jusqu'à Kant ce terme désignait la capacité de contempler la vérité dans le sens platonique, ensuite la signification a évolué, et, de statique, elle est devenue dynamique. Déjà chez Rousseau l'intuition naît du travail, dans le sens d'une opération [...]: le mot «intuition» acquiert la signification de construction.» (1958, p. 45)

L'expérience avec le théâtre de Vitruve a montré l'importance de voir ces opérations, ces opérateurs comme des actions dynamiques pour la «construction» du discours qui décrit l'œuvre architecturale. Et les essais présentés ont validé cette proposition de modélisation des opérateurs. Dans son *Guide pratique sur la recherche qualitative*, J.-P. Deslauriers rappelle que c'est la validité des résultats qui confirme le choix des méthodes utilisées pour répondre à la question de recherche posée (1991). Et à ce propos, T. Tidafi, en présentant la mise à l'épreuve de la modélisation d'actions,

rappelle que cette validité dépend ainsi de la réponse qu'une méthode peut apporter à une question de recherche posée. «Il s'agit alors de considérer la validation de la proposition de modéliser des actions pour la figuration architecturale. À cet effet, cette proposition peut obtenir deux types de validité : une validité interne et une validité externe» (Campbell et Stanley, 1963, Tidafi, 1996).

Dans le cas de l'expérimentation du théâtre de Vitruve, la validation interne, qui est définie comme une relation de cause à effet entre les variables à l'étude, montre, par la modélisation des opérateurs géométriques et sémantiques, que le modèle théorique tient compte et de la structure qui définit les opérateurs et de la façon de procéder pour produire ces structures qui les définissent. Comme le soulignent F. Adreit et P. Mauran (1998), il est possible de répondre comme «observa-acteur-concepteur» à la stimulation de création d'un objet par des solutions qui permettent d'exprimer des modèles mentaux et de les diffuser avec un processus téléologique, évolutif et complexe de construction de modèles sur lesquels raisonner et élaborer.

Cette amplification des activités cognitives n'est pas unidirectionnelle, mais dialectique : elle permet des solutions différentes qui sont, selon les capacités des individus qui les perçoivent, transformées avec un processus itératif pour produire différentes figurations, imprévisibles, pour donner ce «coup de projecteur» qui permet aux acteurs du processus d'enrichir la réflexion avec un résultat dynamique jusqu'à satisfaction :

«Cette différence dans l'évolution des modèles, l'une dynamique, l'autre par sauts successifs, entraîne un décalage entre le modèle mental et le modèle exprimé : la correspondance modèles mentaux/modèles exprimés n'est pas immédiate et demande à un observ-acteur-concepteur un effort cognitif supplémentaire d'interprétation. En contrepartie, d'une part le modèle mental permet aux observ-acteur-concepteurs de s'affranchir des contraintes matérielles et d'explorer cognitivement de nombreuses hypothèses, d'autre part le modèle exprimé est un support de communication suffisamment stable pour que chacun ait le temps de se l'approprier.» (Adreit, 1998, p.82)

Ce qui signifie que le modèle mental libère le concepteur des contraintes auxquelles est soumis le modèle exprimé et peut lui permettre d'innover et de s'approprier l'outil informatique.

Enfin la validité externe de cette expérimentation repose sur la généralisation de ce modèle théorique. Elle est obtenue par la vérification du modèle dans une situation de conception autre qu'architecturale. Elle s'exprime par le caractère collectif du processus de conception. En effet, l'architecte est en continuelle interaction avec les acteurs, utilisateurs et observateurs qui participent activement au processus de conception.

La conception d'interface homme-machine demande la collaboration d'informaticiens pour la conception du logiciel, d'ergonomes pour la conception du dialogue, de graphistes pour celle de l'image. (Adreit, 1998) Ces concepteurs sont les observ-acteur-concepteurs qui construisent collectivement les modèles du phénomène étudié et par le fait même valident l'expérience par un processus de conception qui s'appuie, comme le soulignent F. Adreit et P. Mauran, sur une dialectique conception individuelle/conception collective.

Le contexte expérimental basé sur l'exemple du théâtre de Vitruve et sur les exemples de création et manipulation d'opérateurs géométriques et sémantiques permet d'évaluer la validités interne et externe de la proposition, de modéliser les opérateurs sémantiques qui gouvernent les actions pour la figuration en architecture.

La question de la représentation en architecture n'est pas conjoncturelle, comme on pourrait croire, avec l'arrivée de l'outil informatique et cette nouvelle discipline n'est pas la réponse définitive aux problèmes de communication par le développement des moyens et méthodes où la troisième et la quatrième dimensions prennent leur place. Le spatio-temporel n'est qu'un passage supplémentaire. «Quand l'esprit humain organise un corps de pensée, il le fait presque inmanquablement en termes d'imagerie spatiales», souligne R. Arheim. (1986, p. 267)

L'histoire de l'architecture et de son enseignement illustrent bien comment la figuration et le dessin ont été tour à tour prédominants, écartés ou renouvelés : la figuration est un outil pour la communication, mais elle n'est pas l'unique solution. Paul Quintrand, à l'époque directeur du GAMSAU¹, nous rappelait, déjà en 1984,

¹ Groupe d'études pour l'application des méthodes scientifiques à l'architecture et l'urbanisme, École d'architecture de Marseille-Luminy

qu'utiliser l'outil mathématique, «avec sa rigueur et sa potentialité a été et reste une préoccupation permanente de toute démarche rationalisante», et que, comme le soulignait C. Alexander (1964) dans la *Syntesys of Form*, il était légitime de penser que l'usage de l'informatique devait passer par une «approche mathématique» pour la résolution des problèmes architecturaux. «Mais alors comme aujourd'hui, la faiblesse de l'outil mathématique, non seulement dans sa totalité «problématique», mais plus précisément dans sa totalité géométrique, topologique et perceptible, telle que le concepteur peut la voir et la comprendre, la «visualiser» dans l'espace et le temps du projet, est attestée par «les tenants de l'espace programmable». (1984, p. 11)

Nonobstant les efforts de plusieurs géomètres et tenants de la géométrie descriptive qui, comme G. Monge, attribuent à la géométrie descriptive les qualités d'un langage universel pour la conception, le dessin fonctionne comme une maquette qui n'est pas finale, ni figée et surtout pas définitive. P. Quintrand souligne que :

«C'est à travers la pratique "*figurative*"¹ depuis les premières esquisses jusqu'à la production des plans d'exécution que l'architecte résout la majorité des "*problèmes architecturaux*" non mathématisables², recherche du "*parti*", "*arrangement*" des formes ; le dessin fonctionne comme modèle sur lequel l'architecte bricole par essais et corrections d'erreurs, après évaluation du résultat.» (1984, p. 11)

Une piste de développement est l'intégration des systèmes géométriques et des systèmes de résolution à base de connaissances au sein d'une représentation unifiée de l'objet à concevoir (produit) en vue de l'exploitation de cette représentation dans un système permettant de combiner la géométrie, les connaissances d'un métier et les processus de construction³. L'élaboration d'un modèle d'une scène devra se faire indépendamment des structures de données utilisées dans les systèmes d'aide à la conception. Le modèle unifié devra contenir les connaissances liées à un processus de conception. Ce processus décrit l'activité de conception de produits représentée par une

¹ Tabouret, R., *Figuration graphique en architecture*

² «Les problèmes architecturaux sont assimilables à des "problèmes mal définis", c'est-à-dire dont la formulation de départ est incomplète, non définitive. Newel A., Simon H.A., *human Problem solving*, Englewood cliff, New jersey, Prentice Hall, 1972. Rittel (1973) fait la différence entre les problèmes difficiles ou faciles qui sont susceptibles de solutions par procédures systématiques, et les problèmes "malicieux" méchants.» (P. Quintrand, 1984, p. 11)

³ Les recherches sur la modélisation déclarative menées par L. Popova et V. Popov au département d'informatique de l'Université de Poitiers en France ont grandement contribué au développement de ces pistes de développement pour l'intégration des systèmes géométriques et des systèmes de résolution à base de connaissances.

série d'actions inscrites à différentes étapes de l'élaboration du produit, ou la manière de le faire.

Ainsi les deux premiers stades de communication en architecture, là où les acteurs du projet s'impliquent dans l'énoncé d'un problème et là où les acteurs sont à la recherche d'une solution les opérateurs sémantiques et géométriques fournissent à l'architecte et aux acteurs du processus de conception, la liberté de créer une figuration, même incomplète, de l'objet architectural.

T. Tidafi (1996) avait montré que la modélisation des actions est un moyen pour agir dès qu'une solution architecturale est suffisamment définie pour être traduite par la géométrie jusqu'à l'application concrète de la solution formulée.

Il faut maintenant explorer la possibilité de travailler sur une «morphologie commune» tout au long de ces stades de communication, par une réécriture des fonctions ou par un transfert des fonctions utilisées pour la figuration ou encore par un dialecte (langage) fonctionnel qui permet un lien dialectique entre les opérateurs que j'ai définis et les actions. L'objectif de ce type d'investigation sera de réaliser des systèmes de conception capables de manipuler dans un même modèleur des informations différentes, géométriques et non géométriques, représentées sous différents formalismes. Ces recherches permettront de montrer comment passer d'une modélisation, uniquement géométrique, à une modélisation plus complète, intégrant des aspects différents de la conception et de plusieurs points de vue : structurel, fonctionnel, géométrique, sémantique, etc. Ce passage introduira une modification majeure dans la conception des outils d'aide à la conception. On passera ainsi d'un système CAO graphique à un environnement de développement générique dont le résultat est une application dédiée à un métier donné et utilisable par un concepteur.

On pourra donc mieux répondre à une partie des questions posées tout au long de cette recherche et plus précisément montrer qu'il faut décrire les actions qui déterminent les objets plutôt que l'objet, qu'il faut gérer les opérateurs qui agissent sur ces actions, parce que ce qui nous intéresse ce n'est pas le symbole que nous voyons à l'écran, mais plutôt l'organisation des renseignements que nous avons donnés à l'ordinateur. De cette façon on pourra passer, sans blocages, du modèle conceptuel à celui constructif.

L'idée principale est de proposer un modéleur «virtuel» permettant de décrire la géométrie d'une scène au sein d'un système cible. Pour chaque système cible un interpréteur devrait être mis au point pour exploiter le modèle de la scène décrite et résolue de manière conceptuelle par le modéleur virtuel. Le modéleur pourra être conçu sur la base d'un système à base de connaissances et de savoir-faire d'un domaine d'application comme l'architecture ou le génie mécanique. Il pourra être couplé avec différents types de modéleurs géométriques (CSG, Brep, hybrides) par l'intermédiaire d'interpréteurs des solutions conceptuelles obtenues.

L'attention se portera sur la mise en œuvre d'un ensemble d'outils de haut niveau, souples et génériques, constituant une plate-forme visant à faciliter l'extension et l'évolution du modéleur virtuel indépendamment des outils graphiques de CAO. Il s'agit des outils d'acquisition et de multi-représentation de connaissances, de résolution et de génération, de prise de connaissance, d'évaluation et d'apprentissage qui vont permettre à la fois de modéliser des classes d'objets et aussi de définir des actions représentant des savoirs et des savoir-faire d'un métier.

L'avantage du développement d'une telle plate-forme réside principalement dans la disposition d'outils de haut niveau d'abstraction, proches de la pensée et de l'action d'un concepteur. L'interaction du concepteur avec le système pourra se faire sur une base déclarative. Les buts seront décrits par une liste de propriétés et de contraintes caractéristiques qui doivent être vérifiées afin de répondre au problème posé. Les savoir-faire seront transcrits sous forme d'actions agissant sur les objets et leur organisation. Le système sera alors capable de proposer des solutions par ordre de priorité respectant les descriptions fournies.

D'autres possibilités d'une telle plate-forme de développement générique peuvent être formalisées ainsi :

- organiser les savoir-faire en conception en favorisant la mise en commun des compétences issues de différentes disciplines : modélisation géométrique, visualisation, méthodes de résolution de problèmes de l'IA, acquisition et représentation des connaissances, apprentissage, raisonnement abductif causal probabiliste et raisonnement spatial ;

- déboucher sur des avancées en matière de méthodes et d'outils de représentation et de modélisation avec le souci de privilégier les besoins de l'utilisateur ;
- offrir un cadre d'expérimentation réel pour valider différentes approches et techniques de modélisation utilisées dans le but de développer un système de CAO Intelligent ;
- étudier la représentation spatiale à plusieurs niveaux, incluant les aspects géométriques, informatiques, linguistiques et la résolution des contraintes spatiales.

L'apport d'une telle plate-forme ne se justifie pas par une intégration maximale des fonctions mais par la synergie de connaissances, d'outils spécialisés et de savoir-faire qui doivent constituer la nouvelle intégration destinée à assister un processus de conception.

Cette proposition d'une plate-forme de développement générique impose un certain nombre de caractéristiques. En particulier :

- la manipulation simultanée d'informations qualitatives et quantitatives, complètes et/ou partielles ;
- l'utilisation de langages multi-opérationnels et multi-niveaux ;
- la description, la représentation et la résolution basées sur des connaissances hybrides ;
- la résolution conceptuelle et géométrique de scènes à base de connaissances (et de savoir-faire) ;
- la résolution de contraintes spatiales ;
- le couplage de techniques de raisonnement par tâches/méthodes avec celles de raisonnement causal-probabiliste et avec celles de raisonnement spatial ;
- la génération, l'évaluation et la visualisation de solutions ordonnées ;
- la méta-modélisation déclarative de classes de scènes à concevoir ;
- la méta-modélisation déclarative du processus de résolution ;
- la méta-modélisation fonctionnelle de processus de conception ;
- le test de cohérence des modèles générés ;
- la réutilisation : le projet propose une base de connaissances évolutive de concepts et d'outils courants qui constituent l'ontologie de la modélisation déclarative et d'actions pour la création de scènes 3D ;

- le prototypage rapide : proposition d'outils par défaut permettant le développement rapide d'un prototype.

Le problème de la conception de scènes sera donc plongé dans un contexte de figuration et de résolution conceptuelle à base de connaissances du domaine. Les solutions obtenues se présenteront sous la forme de description des concepts nécessaires pour une interprétation postérieure en mettant l'accent sur les aspects de description, représentation et résolution des connaissances¹.

En terminant, la principale contribution de cette recherche est la démonstration qu'il est possible de «gouverner» dynamiquement ces maquettes qui remplacent le dessin avec un discours procédural lu par l'ordinateur, pour que chaque essai et erreur puisse se transformer en «connaissance» sémantique et géométrique que les outils informatiques pourront traiter à l'occasion d'un nouveau projet. Ces maquettes seront à la fois des outils de figuration pour «voir» et des outils de simulation pour «penser». Et comme le souligne J.-C. Lebahar (1983), l'architecte saura garder dans ses maquettes les «flous» qui permettent la progression de son travail en attendant les informations nécessaires à la résolution des problèmes.

Ma contribution va vers une aide à l'architecte, plutôt qu'à la machine, en montrant que c'est par le «contrôle» de l'incertitude que l'outil informatique peut être adopté pour devenir un puissant moyen de traitement de l'information architecturale. Comme le souligne M. Léglise «Les logiciels de conception assistée par ordinateur pour l'architecture sont massivement utilisés aussi bien dans les agences que dans l'enseignement» , mais «l'utilisation de ces programmes induit une approche instrumentale, qui s'avère extrêmement efficace en phase finale du projet. Mais l'emploi de plus en plus fréquent de ces outils en phase amont place le concepteur dans une tâche centrée sur l'application.» (1999 ; p. 1)

¹ Les recherches sur les langages de modélisation et les résultats des expérimentations ont permis la formulation d'un nouveau projet de recherche, projet conjoint avec le département d'informatique de l'Université de Poitiers en France. (G. De Paoli, L. Popova, V. Popov, S.R. Schwer, T. Tidafi)

Pour donner à l'architecte, au designer, à tout acteur participant à la conception un rôle actif avec l'outil ordinateur, il faut tenir compte de l'activité cognitive et interprétative des acteurs du processus de conception, de l'importance de garder des traces du discours qui gouverne leur travail pour diriger nos recherches vers une nouvelle génération d'outils informatiques qui participent à la manipulation des connaissances et non seulement de l'information.

Des outils qui seront présents, comme la plume de l'écrivain, dès le début de toute phase de conception.

BIBLIOGRAPHIE

- ABELSON, H., Sussman, G. J., Sussman J., *Structure et interprétation des programmes informatiques*, Inter éditions, Paris, 1989
- ADREIT, F., Mauran, P., «Environnement et système, ombre et lumière : l'interface est un clair-obscur», *5^e rencontre européenne MCX, Modélisation de la complexité*, Aix-en-Provence, France, 1996
- ADREIT, F., Vidal, P., «Les modèles en conception», dans *Les Objets en conception*, Europa production, Paris, France, 1998
- AKIN, O., *Psychology of architectural Design*, Pion éd., Londres, 1986
- AKIN, O., «An Exploration of the Design Process», dans *Development in design methodology*, Chichester: John Wiley ed., N.Y., 1984
- ALBERTAZZI, L., «Murales, indici di pericolo, torri pendenti, e spirali in movimento. Le schema temporale delle figure spaziali», dans *La natura della visione*, Edizioni Farhenheit 451, Roma, 1997
- ALEXANDER, C., A City Is Not A Tree, dans *Design After Modernism Beyond the object*, Jhon Thackara ed., Thames and Hudson, 1988
- ALEXANDER, C., C. Ishikawa, Silverstein, M., *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*, Oxford University Press, new York, 1977
- ALEXANDER, C., *Fonctions de l'architecture moderne*, Grammond et Laffont, Paris, 1975
- ALEXANDER, C., *Notes on the Synthesis of Form*, Harvard University Press, Cambridge, 1964
- ALLEN, G. Moore, C., *L'architecture sensible, Espace, échelle et forme*, Bordas, Paris, 1981
- ALLEN, J.-F., «Maintaining Knowledge about Temporal Intervals», dans *Communications of the ACM*, vol. 26, n° 11, 832-843, 1983
- American Institute of Architects, CAD layer Guidelines*, Ed. Michael K. Schley, Washington, 1991
- ANDLER, D., *Introduction aux sciences cognitives*, Gallimard, Paris, 1992

- ANSPACH, M. R., Varela, F., «Le système immunitaire : un "soi" cognitif autonome», dans *Introduction aux sciences cognitives*, Gallimard, Paris, 1992
- APREA, M., «L'occhio dell'angolo: note al De Prospectiva Pingendi di Piero della Francesca», dans *La Natura della visione*, Edizioni Fareneith 451, 1997
- ARCHER, B., «An overview of the structure of Design Process», dans *Emerging methods in Environmental Design and Planning*, MIT Press, Cambridge, Mass, USA, 1970
- ARÈS, V., *Épistémologie historique et heuristique chez Lakatos*, faculté des arts et des sciences, Université de Montréal, Montréal, 1993
- ARGUES, D., AUBERT, S., *Modélisation de scènes tridimensionnelles pour l'animation en synthèse d'images : notion d'arbres ECSG et computation*, AFIG'94, Toulouse, 1994
- ARNHEIM, R., *Dynamique de la forme architecturale*, Pierre Mardaga éditeur, Bruxelles, Belgique, 1986
- ARNHEIM, R., *Art and Visual Perception A Psychology of the Creative Eye*, University of California press, Berkeley, 1974
- ARTIGUES, J., Lebtahi, N., «Du processus du projet au processus de conception», dans *Rencontres MCX 99 Pragmatique et Complexité*, Aix-en-Provence, 1999
- Autodesk Inc., AutoCAD V.13 Reference Manual*, Oakland CA U.S.A., 1994
- BACHELARD, «Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles», dans actes du colloque *Élaboration et justification des modèles* présentés P. Delattre et M. Thellier, Maloine-Doin, Paris, 1979
- BANZ, G., Fournier, A., *Computer Aids in Building Design*, RAIC Research Corporation, Ottawa, 1983
- BARTHET, M.-F., *Logiciels interactifs et ergonomie: modèles et méthodes de conception*, Dunod Informatique, Paris, 1988
- BASTIN, N., *Dictionnaire de la CAO et du Graphisme*, Nouvelles Éditions Marabout, Allier, Belgique, 1991
- BEAUDOIN, J., *Karl Popper*, Presse universitaires de France, 1989
- BENTEL, P., *Idealism and Entreprise: Modernism and Professionalism In American Architecture, 1919-1933*, thèse de doctorat, MIT Architecture, Boston, 1992
- BENVENUTO, E., «L'idée constructive», dans *L'idée constructive*, Picard, Paris, 1987

- BERGERON, H.-P., *L'art et l'intuition intellectuelle*, Fides, Ottawa, 1968
- BERNARD, C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, J.B. Baillière, Paris, 1865
- BERTALANFFY, L., Von, *General System Theory reprinted in General System Theory*, Brazziller, New York, 1969
- BERTOL, D., *Designing DIGITAL SPACE*, John Wiley & Sons, inc., U.S.A., 1997
- BLAU, E, Kaufman, E, *L'architecture et son image*, Centre canadien d'Architecture, Montréal, 1989
- BOGDAN, M. *La voûte byzantine, modélisation du processus de construction*, Note interne, GRCAO, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal, 1997
- BOIS, J.-P., «L'entreprise virtuelle: enjeux et obstacles», actes de *L'interface des mondes réels et virtuels*, Montpellier, France, 1992
- BOUDON P., *Introduction à une sémiotique des lieux*, Les Presses de l'université, Montréal, 1981
- BOUDON Ph., Deshayes, P., Pousin, F., Schatz, F., *Enseigner la conception architecturale*, Édition de la Villette, Paris, 1994
- BOUDON, Ph., «Conception de l'objet et du projet», dans *Ingénierie Systémique*, actes du séminaire des GRASCE, Université d'Aix-Marseille III, Aix-en-Provence, 1994
- BOUDON, Ph., *Introduction à l'achitecturologie*, Dunod, Paris, 1992
- BOUDON, Ph., *De l'architecture à l'épistémologie, la question de l'échelle*, Presses Universitaires de France, Paris, 1991
- BOUDON Ph., Pousin, F., *Figures de la conception architecturale*, Dunod éd., Paris, 1988
- BOUDON, Ph., *Sur l'espace architectural, essai d'epistemologie de l'architecture*, Dunod, Paris, 1971
- BOUDON, R., *À quoi sert la notion de structure*, Gallimard, Paris, 1968
- BOURGINE, P., «Connaissances abductives et compilations de connaissances», actes du 1^{er} congrès européen de systémique, vol. 2 995-1002, Paris, 1989
- BOUTINET, J.-P., *Anthropologie du projet*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990
- BRETON P., *La tribu informatique*, Éditions Métailie, Paris, 1990

- BROADBENT, G. H., «Systèmes, cybernétique et aménagement de l'espace», dans *Journées «Informatique et conception en architecture»*, IRIA, Paris, 1971
- BROADBENT, G., *Design in Architecture*, John Wiley & sons, Chichester, 1973
- BROWN, F.E., *An integrated approach to CAD: modelling concepts in building design and construction*, *Design Studies*, V.16, Elsevier Science Ltd. Londres, 1995
- BULLET, P., *L'architecture pratique*, Minkoff Reprint, Genève, 1973
- BURDESE, J.-C., «Question de méthode, ou question de conception», dans *Informatique et architecture — Les cahiers de la recherche architecturale*, N.23, Éditions Parenthèses, Marseille, 1988
- BURFORD, A., *Craftsmen in Greek and Roman Society*, Thames and Hudson, Londres, 1972
- C. MOORE, G. Allen, *L'architecture sensible, Espace, échelle et forme*, Bordas, Paris, 1981
- CADOZ, C., *Les réalités virtuelles*, Flammarion, Paris, 1994
- CALVAIRE, A., *Intégration de la multireprésentation en CAO*, Etablissement aérospatiale de Cannes et Laboratoires 13S, Cannes, 1996
- CAMPBELL, D., Stanley, J. C., *Experimental and quasi-experimental designs for research*, Rand McNally & Company, Chicago, 1963
- CANNISTRACI, P., *Semiotica dell'architettura — Nuovi contributi ai principi creativi nella progettazione*, Gangemi editore, 1996
- CARNAP, R., *Logische syntax der sprache*, Springer, Wien, 1934
- CARTIER, M., *Grammaire iconique*, Université du Québec à Montréal, Montréal, 1991
- CASTELNUOVO, E., «L'objet et l'action dans l'enseignement de la géométrie intuitive», dans *Le matériel pour l'enseignement des mathématiques*, Delachaux et Niestlé S.A., Neuchatel, Suisse, 1958
- CAUDILL, W.W., *Architecture by Team*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1971
- CAYE, P., L'architecture et la question de la technique, dans *Situations— Les cahiers de la recherche architecturale*, N.37, Éditions Parenthèses, Marseille, 1996
- CECCARINI, P., *Résistance des formes et topologie du sens*, Éditions HYX, Orléans, France, 1997
- CHARMAN, P., *Gestion des contraintes géométriques pour l'aide à l'aménagement spatial*. Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et chaussées, Paris, 1995.

- CHEN, H., *Representation, Evaluation and Edition of Features-based and Constraint-based Design*, thèse de doctorat, Purdue University, 1995
- CHING, F.D.K., *Le design d'intérieur*, Gaëtan Morin Éditeur, 1995
- CHISUOLM, R., *Theory of Knowledge*, Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J., 1966
- CHOAY, F., *L'urbanisme, utopies et réalités. Une anthologie*, Éditions du Seuil, 1965
- CHOISY, A., *De Architectura, Vitruve*, F. De Nobelle, Paris, 1971
- CHOMSKY, N., *Le langage et la pensée*, Petite Bibliothèque Payot, Paris, 1973
- CHOMSKY, N., *Aspects de la théorie syntaxique*, Éditions du Seuil, Paris, 1971
- CHOMSKY, N., *language and Mind*, Brace and World, Harcourt, New York, 1968
- CHUPIN, J.-P., *Le projet analogue : les phases analogiques du projet d'architecture en situation pédagogique*, thèse de doctorat, Université de Montréal, Faculté de l'aménagement, Montréal, 1998
- CHUPIN, J.-P., L'église, M., «Un carnet de schémas analogiques pour les phases préliminaires de la conception architecturale», dans *Sciences et Techniques de la conception*, Vol. 5 N.2, Europa productions, Paris, 1996
- CHURCHMAN, Ackoff, Arnoff, *Introduction to Operations research*, John Wiley and Sons, New York, 1957
- CIMATTI, F., «La percezione non è meramente passiva : contro un luogo comune filosofico», dans *La natura della visione*, Edizioni Farhenheit 451, Roma, 1997
- CINI, M., Janicaud D., «Sciences galiléennes et sciences darwiniennes», dans *Les pouvoirs de la science*, Paris, 1987
- CIRIBINI, G., *Metodi e strument logici per la progettazione architettonica*, Les Presses de l'École Polytechnique, Torino, 1973
- CLAGETT, M., «A supplement on the Medieval latin Traditions of conic Sections», *Archimedes in the Middle Age*, American Philosophical Society, Vol.4 partie I Philadelphie, 1980
- CLAY, S., Wiliams, J., «Put : language-Based Interactive manipulation of Objects», dans *IEEE Computer Graphics and Applications*, Los Alamitos, California, 1996
- COLIN, C., Desmontils, E., Martin, J.-Y., Mounier, P., *Modélisation déclarative : Vision de l'utilisateur*, Rapport de Recherche, École des Mines de Nantes 97-8-INFO, IRIN-152, 1997

- COMAR, P., *La perspective en jeu. Les dessous de l'image*, Découvertes Gallimard sciences, Paris, 1992
- COMMUTÉ/EC2/Montpellier L.R., *Informatique 93, les 50 mots-clés de la réalité virtuelle et des interfaces homme/machine*, Montpellier, France, 1993,
- CONAN, M., *Concevoir un projet d'architecture*, l'Harmattan, Paris, 1990
- CONAN, M., *Les processus de conception architecturale*, rapport final de recherche, convention CSTB/Plan construction, 87.61.434, Paris, 1989
- CONTANDRIOPOULOS, A.-P., Champagne, F., Potivin, L., Denis, J.-L., Boyle, P., *Savoir préparer une recherche*, Les Presses de l'Université de Montréal, Montréal, 1990
- COSTE, A., «Le modèle en architecture», dans *Imaginaire technique— Les cahiers de la recherche architecturale*, N.40, Éditions Parenthèses, Marseille, 1997
- COUTAZ, J., *Interface homme-ordinateur. Conception et réalisation*, Dunod informatique, 1990
- COUWEMBERGH, J.P., *L'indispensable pour la C.A.O. La Conception Assistée par Ordinateur*, Nouvelles éditions Marabout, Alleur, Belgique, 1991
- COYNE, R., Snodgrass A., *Problem Setting Within Prevalent Metaphors of design*, Design issues: vol 11, n°2, MIT Press, Cambridge, 1995
- CRAD, S.K., Moran, T.P. et Newell, A., «The GOMS Model of manuscript editing», dans *The Psychology of Human Computer Interaction*, Earlbaum Hillsdale, N.J., 1983
- CREVIER, D., *À la recherche de l'intelligence artificielle*, Flammarion, Paris, 1997
- CRONBACH, L.J., *Essentials of Psychological Testy*, Harper & Row, New York, 1970
- CROSLEY, M.L., *The Architect's guide to Computer-Aided Design*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1988
- CROZIER, M., Friedberg, E., *L'acteur et le système*, Éditions du Seuil, Paris, 1977
- D'ALFONSO, E., Samsa, D., *L'architecture*, Mondadori editore, Milano, 1994
- D'ESPOUY, A., *Fragments d'architecture antique d'après les relevés et restaurations des pensionnaires de l'Académie de France à Rome*, Paris, 1896-1905
- DALMAS, A., *Les dix livres d'architecture, VITRUVÉ*, Éditions Errance, Paris, 1986
- DARKE, Jane, «The Primary Generator And The Design Process», dans *Edra*, N.9, U.S.A., 1978

- DAVIDSON, C. H., *AME 6502 Notes de cours*, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal, Montréal, 1995
- DAVIDSON, C.H., Davidson, P., Ruberg, K., «Expert Systems and the Use of Information in Building Design and construction», dans *The Journal of Documentation*, Vol.44, N.2, 1988
- DAVIDSON, C.H., «The Building Team», dans *Encyclopedia of architecture : Design, Engineering and Construction*, Ed. J. Wiley and Sons, New York, 1988
- De CAMBRAY, B., *Modélisation 3D: état de l'art*, Institut Blaise Pascal, Laboratoire de méthodologie et architecture des systèmes informatiques, Paris, 1992
- De KETELE, J.-M., ROEGIERS, X., *Méthodologie du recueil d'informations: fondements de méthodes d'observations, de questionnaires, d'interviews et d'études de documents*. Département De Boeck Université, Paris, 1996
- DE PAOLI, G., Bogdan, M., « The front of the Stage of Vitruvius' Roman Theatre : A new Approach of Computer Aided Design that Transforms Geometric Operators to Semantic Operators», dans *CAADFutures99*, Atlanta, 1999
- DE PAOLI, G., Bogdan, M., «The Backstage of Vitruvius' Roman Theatre : A new method of Computer-Aided Design that Reduces the Gap between the Functional and the Operational», dans *CAADRIA 99 Proceedings*, Shanghai, 1999
- DE PAOLI, G., «La CAO en architecture: modélisation des actions et définition des opérateurs», Actes de 01DESIGN, *les objets en conception*, INRIA, Sophia Antipolis, 1997
- DE PAOLI G., Marty A., *Architecture et simulation informatique et création industrielle*, rapport final, Ministère de l'Enseignement supérieur, programme ETS-1294, Québec, 1996
- DE PAOLI, G., Pellissier, P., *Dessin d'architecture par ordinateur*, Éditions Berger, Québec, 1992
- DE PAOLI, G., *Dessin assisté par ordinateur , Essai, examen et manipulation de logiciels : bilan des activités, 1987/1988 au Cégep de Saint-Laurent* , Ministère de l'Enseignement supérieur, Québec, 1988
- DE PAOLI, G., Pellissier, P., Shamlan, G., *Se Bâtir*, vol. II, Ro-Na inc., Boucherville, 1984

- DE PAOLI, G., Pellissier, P., *"Transmedia junction", l'architettura alternativa negli Stati Uniti d'America*, thèse de doctorat, École Polytechnique de Turin, Faculté de l'architecture, Turin, 1974
- DE ROSNAY, J., *Le macroscopie, vers une vision globale*, Éditions du Seuil, Paris, 1975
- DEBONO, M.-W., *L'ère des plasticiens*, Éditions M. Aubin, Paris, 1996
- DEBONO, M.-W., «Art et sciences : les fruits de l'archipel», dans *Les résumés des conférences du M.C.X./A.P.C.*, Modélisation de la complexité et Association pour la Pensée Complexe, site web <http://www.mcxapc.org/>, 1988
- DELALTRE, P., *Systèmes structures, fonctions, évolution*, Maloine-Douin Éd., Paris, 1971
- DESCARTES, R., «Le monde ou traité de la lumière», Jacques Le Gras, Paris, traduction italienne *Il mondo o trattato della luce*, dans *Opere filosofiche*, vol. 1, Utet, Torino, 1994
- DESCARTES, R., «Les passions de l'âme», Jacques Le Gras, Paris, traduction italienne *Le passioni dell'anima*, Laterza, Bari, 1966
- DESCARTES, R., *Le discours de la méthode*, Garnier-Flamarion, 1966
- DESHAYES, C., «L'entre-deux de l'objet», dans *Les Objets en conception*, Europaia production, Paris, France, 1998
- DESHAIES, P., «Architecture et théorie», *Cahiers de la Recherche architecturale*, Marseille, 1986
- DESLAURIERS, J.-P., *Recherche qualitative : guide pratique*, McGraw-Hill, New York et Montréal, 1991
- DESMONTILS, E., *Les modeleurs déclaratifs*, RR IRIN, Nantes, 1995
- DIELS, H., Kranz, W., *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Laterza, Bari, 1969
- DIF, J., *Images 3D*, Sybex, Fr, 1996
- DION, E., *Invitation à la théorie de l'information*, Éditions du Seuil, Paris, 1997
- DONIKIAN, S., *Une approche déclarative pour la création de scènes tridimensionnelles : applications à la conception architecturale*, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 1992
- DRETSKE, F., «Seeing, believing and Knowing», dans *An invitation to Cognitive Science, vol. 2, Visual Cognition and Action*, Osherson, D., Kosslyn, S., Hollerbach, J., eds., Cambridge, Mass., 1990

- DUPLAY, C., Le Stade de France, de la main à la machine, dans *EAPV, Bulletin d'information de l'École d'architecture Paris-Villemin*, N. 29, Paris, 1998
- DUPLAY, C. DUPLAY, M., *Méthode illustrée de création architecturale*, CEP Éditions du Moniteur, Paris, 1985
- DURAND, J.N.L., *Précis d'architecture à l'école royale polytechnique*, 3vol., Paris, 1825
- DÜRR, M., *Using conventional and nested relational database systems for modelling CIM data*, Faculté d'informatique, Butterworth & Co Publishers, Karlsruhe, 1989
- EASTMAN, C., «Cognitive Processes and Ill-Structured Problems : a case Study from Design», dans *The International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Washington, 1969
- EASTMAN, C.M., «Experiments in Architectural Design development using CAD», dans *CAAD futures '91 Proceedings*, Gerhard N. Schmitt, Zürich, 1991
- EASTMAN, Charles M., *Computability of design*, Yehuda E. Kalay ed., Buffalo, 1987
- EC2, Informatique '93, *L'interface des mondes réels et virtuels*, EC2 éd., Montpellier, France 1993
- ECO, U., *Kant et l'ornithorynque*, Bernard Grasset éditeur, Paris, 1999
- ECO, U., *La production des signes*, Librairie générale française, Paris, 1992
- ECO, U., *Semiotica e filosofia del linguaggio*, Einaudi, Torino, 1984
- EDNEY, J.J., «Property, Possession and Permanence : A Field Study in Human Territoriality», dans *Journal of Applied Social Psychology*, no 2, U.S.A., 1972
- EHRENZWEIGH, A., *L'ordre caché de l'art*, Gallimard, Paris, 1974
- EMMERICH, D. G., *Une utopie rationnelle*, Musée des Beaux-Arts d'Orléans, Éditions HYX et les auteurs, Orléans, 1997
- EPICURO, «Epistola a Erodoto», traduction italienne dans Epicuro, *Opere*, trad. Isnardi Parente, Utet, Torino, 1974
- EPRON, J.-P., «L'ecclétisme technique», dans — *Les cahiers de la recherche architecturale*, N.29, Éditions Parenthèses, Marseille, 1992
- EPRON, J.-P., «Le problème de la description. De Bullet à Rondelet», dans *L'idée constructive*, Picard, Paris, 1987
- EVANS, R., «La projection», dans *L'architecture et son image*, Centre canadien d'Architecture, Montréal, 1989

- FAREL, A., *Le troisième labyrinthe Architecture et complexité*, Les éditions de la Passion, Montreuil, 1991
- FERGUSSON, E.S., *Engineering and the mind's eye*, MIT Press, Cambridge, 1992
- FERRO, S., «La fonction modélisante du dessin à la Renaissance», dans *L'idée constructive*, Picard, Paris, 1987
- FINDELI, A., *Le bauhaus de Chicago*, Les Éditions du Septentrion, Sillery, 1995
- FLEMMING, U., «Get with the program : common fallacies in critiques of computer-aided architectural design», dans *Environment and Planning B*, vol.21, 1994
- FOLEY, J.D., et all, *Introduction to computer graphic*, Addison-Wesley, Don Mills, Ont., Canada, 1994
- FORGIA, A., «Les nouveaux systèmes de représentation et le projet architectural», dans *Informatique et Architecture — Les cahiers de la recherche architecturale N.23*, Éditions Parenthèses, Paris, 1988
- FORTIN, C., Rousseau, R., *Psychologie cognitive : une approche de traitement de l'information*, Sillery, Québec, 1989
- FOX, D. J., *The Research process in education*, Holt, Rinehart and Winston, Montreal, New York, 1969
- FUCHS P., *Les interfaces de la réalité virtuelle*, Société Le Corum, Montpellier, 1996
- GAARDER, J., *Le monde de Sophie*, Seuil, Paris, 1995
- GAGNON, Y.-C., *Le comportement du dirigeant de PME dans le processus d'adoption de nouvelles technologies*, thèse de doctorat, HEC Administration, Université de Montréal, 1992
- GAMSAU, Groupe d'études pour l'application des méthodes scientifiques à l'architecture et l'urbanisme, *Rapport d'activité 1990-1993 et Programme scientifique 1994-1997*, École d'architecture de Marseille-Luminy, Marseille, 1994
- GANASCIA, J.-G., *L'intelligenza artificiale*, Il Saggiatore et Flammarion, Milano, 1997
- GARCIA, F., «Prise en compte des facteurs humains dans la conception des postes de travail», dans *Génie logiciel et Systèmes experts*, N.24 Nanterre, 1991
- GARDNER, J., *The Mind's New Science*, Basic books, New York, 1985
- GASQUEL, *Fabule : un environnement de recherche pour l'animation et la simulation*, IMAGIS/INAG-INRIA, France, 1996

- GATENBY, N., Preston, N., Hewitt, W.T., *The Manchester Scene Description Language*, CGU 88, Manchester Computing Centre, Manchester, 1993
- GERMAN, G., *Vitruve et le vitruvianisme, introduction à l'histoire de la théorie architecturale*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1991
- GERO, J.S., «A Model of Designing that Includes its Situatedness», dans *CAADRIA 99 Proceedings*, Shanghai, 1999
- GERO, J., «Future roles of knowledge-based systems in the design process», dans *CAAD futures, '87*, Elsevier Publisher, Amsterdam, 1987
- GERO, J.S., *Design Prototypes: a knowledge representation schema for design*, Design Studies, vol 11 N. 4, , Elsevier Science Ltd., London, 1987
- GHEORGHIU, A., *La représentation des structures constructives*, Editions Eyrolles, Paris, 1968
- GIBSON, J., *The Ecological Approach to Visual Perception*, Erlbaum, Hillsdale, 1979
- GLEICK, J., *La théorie du CHAOS, Vers une nouvelle science*, Flammarion, Paris, 1991
- GOLDSCHMIDT, G., Verstinjnen, J.M., Van Leeuwen, C., Hamel, R., Mennessey, J. M., «Sketching and creative discovery», *Design Studies*, V.19 no 4, Elsevier Science Ltd., London, 1998
- GOLDSMITH, G., «On Design Reasoning : Contents and Structure», dans *Rencontres MCX 6*, Poitiers, 1997
- GOODALL, M.C., *Science and the politician*, Schenkman ed., Cambridge, 1965
- GRANATH, I.A., *Architecture Technology and Uman factors, Design in a Socio-technical Context*, School of Architecture, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1991
- GREGORY, R., *Eyes and Brain. The Psychology of seeing*, Weidenfeld and Nicholson, London, 1990
- GROMORT, G., *L'architecture en Grèce et à Rome*, Vincent Fréal & Cie, Éditeurs, 1957
- GRUMBACH, A., «Passion syntagmatique», dans *Architecture d'aujourd'hui*, N.283, Paris, 1992
- GUBA, E.G., *The Paradigm Dialog*, Sage Publications, Thousand Oaks, 1994
- GUBA, G., LINCOLN, Y.S., *Handbook of Qualitative Research*, Sage Publications, Thousand Oaks, 1994

- GUENA, F., ZREIK, «Un système de conception architecturale assisté par architecte», dans actes des *Journées européennes sur les applications de l'intelligence artificielle en architecture*, Hermès, Paris 1988
- GUGLIELMI, L., Miglioli, P., *VRML*, Jackson libri, 1996
- GUIRAUD, P., *La sémantique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1969
- GUITÉ, M., *travaux de recherche sur la CAAO (Conception architecturale assistée par ordinateur)* à l'École d'architecture, Faculté de l'aménagement, Montréal, 1995
- HAYEK, F.A., «The Theory of Complex Phenomena», dans *The critical approach to science and philosophy*, Mario Bunge, London, 1964
- HERNERT, P., *Les algorithmes*, Presses Universitaires de France, Paris, 1995
- HERRANDO, J., *EXCEPTION V.2.6, Manuel d'utilisation*, Montpellier, 1995
- HERSHBERGER, R.G., A Study of Meaning and Architecture, dans *Man and Environment*, Vol. 1 no. 6, 1968
- HJELMSLEV, L., *Prolégomènes à une théorie du langage*, Éd. Du Minuit, Paris, 1968
- HUFFLEN, J.-M., *Programmation fonctionnelle en Scheme, de la conception à la mise en œuvre*, Masson éditeur, Paris, 1996
- IORDANOVA, I., Tidafi, T., «Modélisation par actions d'objets-type en architecture», dans *Actes de l'ACFAS 99*, Ottawa, 1999
- ITTELSON, W. H., «Environmental Perception and Urban Experience», dans *Environmental and Behavior*, Vol. 10 N.2, Sage Publications inc., 1978
- JARROSSON, B., *Le quatuor des épistémologues, Science et avenir*, N° 549, nov. 1992
- JAVEAU, C., *Conversation de MM. Durkheim et Weber sur la liberté et le déterminisme lors d'un passage de M. Weber à Paris*, Les Éperonniers, Paris, 1989
- JEAN, G., *Langage de signes, l'écriture et son double*, Découvertes Gallimard-Archéologie, Paris, 1989
- JOLIVAT, B., *La réalité virtuelle*, Presses Universitaires de France, Paris, 1996
- JONES, J.C., *A method of systematic design., Development in design methodology*, John Wiley ed., Chichester, 1984
- JONES J.C., «The State of the Art in Design methods», dans *Emerging methods in Environmental Design and Planning*, MIT Press, Cambridge, Mass, USA, 1970

- JUNG, C.G., *Essai d'exploration de l'inconscient*, Éditions Robert Laffont, Paris, France, 1964
- KALAY, Y., E., «Redifining the role of computer in architecture : from drafting modelling tools to knowledge-base design assistant», dans *Computer-Aided design, Proceedings of ASME International Computer in Engineering Conference and Exhibition*, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1985
- KANDISKY, W., *Du spirituel dans l'art et dans la peinture en particulier*, Éditions Denël, Paris, 1969
- KAY, A., *Microelectronics and the Personal Computer*, *Scientific American*, septembre, U.S.A., 1977
- KEHRER, Vatterott, «Integration Aspect of STEP and their Expression in the CAO Reference Model, Modelling and Graphics», dans *Sciences and Technology*, 1996
- KHUN, T., *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, Paris, 1983
- KLAUE, Karen, Fluckiger, M., *La Perception de l'environnement*, Delachaux et Niestle, Lausanne, 1991
- KOSSLYN, S., M., *Image and Mind*, Harvard University Press, Cambridge, Ma, 1980
- KRISHNAMURTHY, E.V., *Parallel Processing : Principles and Practice*, Addison-Wesley, Publishing Company, U.S.A., 1989
- KRUFT, H.-W., *A History of Architectural Theory from Vitruvius to the Present*, Princeton Architectural Press, 1994
- LAKATOS, I., *Preuves et réfutations essai sur la logique de la découverte mathématique*, textes présentés par John Worall et Elie Zahar ; traduction de Nicolas Balacheff et Jean-Marie Laborde, Hermann, Paris, 1984
- LASSOUED, H., *La programmation auto-adaptive, exercice de modélisation du processus de conception*, GRASCE, CNRS Université de droit, d'Economie et des Sciences, Aix-en-Provence, 1991
- LAWRENCE, R-J., «Characteristics of Architectural Design Tools», dans *Architecture et Comportement*, Vol.8, Lausanne, 1992
- LAWSON, B., *How Designer Think*, The Architectural Press, London, 1980
- LE CORBUSIER, De Pierrefeu, F., *La maison des hommes*, Librairie Pion, Paris, 1942
- LE MOIGNE, J-L., «Pragmatique et Complexité», dans *Actes de la rencontre MCX 99*, Aix-en-Provence, 1999

- LE MOIGNE, J.-L., «Recherche scientifique en architecture», dans *La recherche en architecture, un bilan international*, Parenthèses, Paris, 1986
- LE MOIGNE, J.-L., *La théorie du système général : théorie de la modélisation*, Presses Universitaires de France, 1977
- LE MOIGNE, J.-L., *Les épistémologies constructivistes*, Presses universitaires de France, Paris, 1995
- LEBAHAR, J.-C., «Machine à dessiner informatique : dimensions de l'alternative coup de patte/automate», dans *L'image en architecture "les machines à dessiner"*, Musée d'histoire de Marseille, IIRIAM, Marseille, 1984
- LEBAHAR, J.-C., *Le dessin d'architecte, simulation graphique et réduction d'incertitude*, Éditions Parenthèses, Roquevaire, 1983
- LEGENDRE-BERGERON, M.-F., *Lexique de la psychologie du développement de Jean Piaget*, Gaëtan Morin, Chicoutimi, 1980
- LÉGLISE, M., «Des systèmes d'aide à la conception aux dispositifs de stimulation du concepteur», dans *Actes de l'ACFAS 99*, Ottawa, 1999
- LÉGLISE, M., «Des objets architecturaux aux objets de la conception architecturale», dans *Actes de 01DESIGN, les objets en conception*, INRIA, Sophia Antipolis, 1997
- LÉGLISE M., «Art under constraint - preserving the creative dimension in computer-aided architectural design», dans *Languages of design*, N. 3, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Hollande, 1995
- LEHMANN, R., *L'acoustique des bâtiments*, Presses Universitaires de France, Paris, 1961
- LELEU-MERVIEL, S., «Les techniques de pointe pour la valorisation du patrimoine : le concept de visite guidée virtuelle d'édifices disparus», dans *Actes L'interface des mondes réels et virtuels*, Montpellier, 1992
- LÉVY, P., *Qu'est-ce que le virtuel*, Éditions La découverte, Paris, 1995
- LUCAS, M., Desmontils, E., «Les modeleurs déclaratifs», *Revue internationale de CFAO*, France, 1996
- MACMILLAN, J., Schumacker S., «*Ethnographic Research*», in *Research in Education: A Conceptual Introduction*, Little Brown, Boston, 1984

- MAGNAGO LAMPUGNANI, V., *Visionary Architecture of The Twentieth century*, Verlag Gerd hatje Ed. , Stuttgart, 1982.
- MAHALINGMAN, G., «Object-oriented computer-aided design, System for the preliminary design of auditoria», dans *Journal of Architectural and Planning Research*, Automne 1996, Locke Science Publishing Company, U.S.A., 1996
- MALVERTI, X., *L'idée constructive*, Picard, Paris, 1987
- Ordre des architectes du Québec, Manuel de pratique des architectes*, Montréal, 1981-1995
- MARKUS, T. A., *Building Performance*, Halsted Press, New York, 1972
- MARSHALL, C., «A Supplement on the Medieval Latin Tradition of Conic Sections», dans *Archimedes in Middle Ages*, American Philosophical Society, Philadelphie, 1980
- MARTIN, C., «Entre la logique du savoir et de l'action», dans *Les méthodes de la recherche qualitative*, PUQ, Québec, 1987
- MARTIN, P., *Un système de génération déclarative de polyèdres*, rapport N 89-02, LISIT, Université de Nantes, juin, 1989
- MARTY, A., «Formes pascaliennes : éléments d'une géométrie descriptive des formes gauches», *Actes de l'ACFAS 99*, Ottawa, 1999
- MARTY, A., *Randonnée infographique*, Journées d'étude du 9 et 10 novembre 1995, Paris: Écoles d'architecture, 1995
- MARTY, A., *Le programme μ Ray*, Montpellier: École d'architecture du Languedoc-Roussillon, 1994
- MARTY, A., *Introduction à l'informatique*, EALR, Montpellier, 1992
- MARTY, A., *Microarchitecture μA* , Villeneuve de la Raho, France, 1990
- MATURANA, H., Varela, F., *The Tree of Knowledge*, D. Reidel, Boston, 1987
- Mc KECHNIE, G., *Simulation Techniques in environmental Psychology, Perspectives on Environment and Behavior: Theory, Research and Applications*, New York: Stokols ed., 1977
- McCARTY, J., «Recursive fonctions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine», dans *Part I, CACM Vol.3*, no 4, 1960
- McGILL, W., KORN, J.H., Awareness of urban environment, dans *Environment and Behavior*, N.14, Sage Publications inc., 1982

- McGOWN, A., Green, A., Rodgers, P.-A., «Visible ideas : information patterns of conceptual sketch activity», dans *Design studies*, Volume 19, N.4, 1998
- McHALE ., *R.Buckminster Fuller*, George Braziller, New York, 1962
- McKECHNIE, G., *Simulation Techniques in Environmental Psychology. Perspectives on Environmental and Behavior : Theory, Research and Applications*, Stokols, D. Ed, New York, 1977
- MEINI, C., Paternoster, A., «Percezione non epistemica e competenza semantica», dans *La natura della visione*, Edizioni Farhenheit 451, Roma, 1997
- MERLEAU-PONTY, M., *Phénoménologie de la perception*, Gallimard, Paris, 1945
- MIAOULIS, G., Plemenos, D., *Le projet MultiCad*, Rapport de recherche MSI 96 - 03, France, 1996
- MIGNE, J.-P., Aurelius Augustinus, *De Libero arbitrio*, 1877
- MITCHELL, C.T., *Redefining Designing : From Form to Experience*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993
- MITCHELL, W. J., *Computer-aided Architectural Design*, Petrocelli-Charter, New York, 1997
- MITCHELL, W. J., Ligget, Kvan, *The Art of Computer Graphics Programming*, New York: Van Nostrand Reinhold Co, 1987
- MITCHELL, W. J., *The Logic of architecture*, MIT Press, Cambridge, 1989
- MITCHELL, W., «Picture This. Build That», dans *Algorithms, Machines and Architectural performances*, Harvard Design Magazine, Harvard, 1998
- MONGEAU, P., *Analyse et évaluation géométrique et psychologique de la représentation spatiale et de son développement*, thèse de doctorat, Université de Montréal, Faculté de l'Aménagement, Montréal, 1989
- MORIN, E., *Introduction à la pensée complexe*, ESF éditeur, Paris, 1994
- MORIN, E., *La méthode*, Tomes I, III, Éditions du Seuil, Paris, 1981
- MORRIS, Ch., *Sign, Language and Behavior*, Prentice Hall, New York, 1946
- MURTY, P., Chase, S., Nappa, J., «Evaluating the Complexity of CAD Models in Education and Practice», dans *CAADRIA 99 Proceedings*, Shanghai, 1999
- NANCY, J.L., *The Muses*, Stanford University Press, Stanford, 1996
- NEGROPONTE, N., *L'homme numérique*, Éditions Robert Laffont, Paris, 1995

- NEGROPONTE, N., «La sémantique des machines en architecture», dans *Journées «Informatique et conception en architecture»*, IRIA, Paris, 1971
- OATLEY, K., *Perception and Representation*, Methuen, London, 1978
- OUELLET, A., *Processus de recherche : une approche systémique*, Presses de l'Université du Québec, Sillery, Québec, 1981
- OUSSALAH, C., *Ingénierie Objet*, Inter édition, Paris, 1997
- OXMAN, R., «Remembrance of things past», dans *Automation in Construction* (2), 1993
- PANOFSKY, E., *"Idea" : ein Beitrag zur Begriffsgeschichte der alteren Kunsttheorie*, B.G. Teubner, Berlin, 1924
- PARISEL, C., T. Tidafi, «Le modèle en architecture dans un contexte informatique, Redéfinitions ou propositions», dans *EAPV, Bulletin d'information de l'École d'architecture Paris-Villemin*, N. 29, Paris, 1998
- PARISEL, C., *Description des possibilités de modélisation du GRCAO, La métairie Saint-Gabriel*, Note interne, GRCAO, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal, 1998
- PARISEL, C. *Le dôme géodésique de B. Fuller*, Note interne, GRCAO, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal, 1997
- PARISEL, C., PHO, A. D.-H., «Évolution spatio-temporelle d'un ouvrage construit. Vers une méthode de représentation informatique», dans *Sciences et Techniques de la Conception*, Vol. 5 no 2, Europa Productions, Paris, 1996
- PARISEL, C., *La recherche et la pratique de l'architecture*, Note interne, Département d'architecture, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal, 1997
- PARISEL, C., *Essai sur la codification graphique des immeubles pour des fins de gestion*, Notes de recherche, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal, Montréal, 1990
- PARROCCHIA, D., *La raison systématique : essai d'une morphologie des systèmes philosophiques*, J. Vrin, Paris, 1993
- PASSINI, R., «The Spatio-Cognitive Abilities of the Visually Impaired Population», dans *Environment and Behavior*, Vol. 22 no 1, Sage Publications inc., 1990
- PASSINI, R., *Notes de cours, AME 7302*, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, Montréal, 1995
- PEIRCE, C.S., *Collected Papers*, Harvard University Press, Cambridge, 1931

- PENG, Y., Reggia, J. A., *"Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving"*, Springer-Verlag, 1990
- PESSA, E., «La simulazione artificiale della visione. Dall'input alla rappresentazione simbolica», dans *La natura della visione*, Edizioni Farhenheit 451, Roma, 1997
- PETROSKI, H., *Design Paradigm: Case Histories of Error and Judgment in Engineering*, University Press, Cambridge, 1994
- PIAGET, J., INHELDER, B., *La représentation de l'espace chez l'enfant*, Publications Universitaires de France, Paris, 1972
- PIAGET, J., *Épistémologie des sciences de l'homme*, Gallimard, Paris, 1970
- PIAGET, J., *La psychologie de l'enfant*, Presses Universitaires de France, Paris, 1967
- PIAGET, J., *Les mécanismes perceptifs*, Presses Universitaires de France, Paris, 1961
- PIERANTONI, R., «Le discipline visive al termine del millennio», dans *La natura della visione*, Edizioni Farhenheit 451, Roma, 1997
- PIERO DELLA FRANCESCA, *De Prospectiva pingendi*, Nicco-Fasola G. éditeur, Le Lettere, Firenze, 1984
- PIETROFORTE, R., *Communication and Use of Design Information in the Building Delivery Process, 1919-1933*, thèse de doctorat, MIT Civil Engineering, Boston, 1992
- PINKER, S., «Mental Maps, Mental Images, and Intuition about Space», dans *Behavioral and Brain Sciences* no2, 1979
- PLEMENOS, D., *Contribution à l'étude et au développement des techniques de modélisation, génération et visualisation de scènes*, Thèse de doctorat d'état en informatique, Université de Nantes, 1991
- POISSON, C., *Sémiotique et objet technique*, mémoire de maîtrise, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, 1991
- POITIÉ, P., «Pour une histoire de la construction», dans *L'idée constructive*, Picard, Paris, 1987
- POPOVA, L., Popov, V., «Classement dynamique multicritère par tri connexionniste», *6ème rencontre de la Société Francophone de Classification*, SFC '98, 21-23 Septembre, Montpellier, France, 1998
- POPOV, V., Popova, L., De Paoli, G., «Towards an objects-oriented language for the declarative design of scenes», dans *ACADIA 98*, Québec, 1998

- POPOVA, L., Popov, V., «Positionnement déclaratif par contraintes spatiales», GDR-PRC I3 Information-Interaction-Intelligence, *Journées Nationales Modèles spatio-temporels*, Lyon, 1998
- POPOV, V., Popova, L., «Vers un langage à objets de conception déclarative de scènes en synthèse d'image» Poster à la 5^e table ronde francophone sur la Conception Design' 97, Theule-sur-mer, 1997
- POPOV, V., Popova, L., «Une approche connexionniste de modélisation déclarative de scènes», *Journées Nationales Réalité virtuelle*, Toulouse, 1996
- POPOVA, L., «Vers une modélisation spatiale hybride en conception déclarative des scènes», dans *Actes de l'ACFAS 99*, Ottawa, 1999
- POPPER, K., *Conjectures et réfutations*, Payot, Paris, 1986
- POPPER, K., *La société ouverte et ses ennemis*, Seuil, Paris, 1979
- PORTOGHESI, P., *Au-delà de l'architecture moderne*, Éd. de l'Équerre, Paris, 1981
- PRENIS, J., *The dome builder's Handbook*, Running Press, Philadelphia, 1973
- PROST, R., «La conception architecturale confrontée à la turbulence de la pensée contemporaine», dans *Concevoir — Les cahiers de la recherche architecturale*, N.34, Éditions Parenthèses, Marseille, 1993
- PROST, R., *Conception Architecturale, une investigation méthodologique*, L'Harmattan, Paris, 1992
- PROST, R., «Les discours théoriques en architecture et le rapport connaissance/action», dans *La recherche en architecture, un bilan international*, Parenthèses, Paris, 1986
- PURCELL, A.T., «Environmental perception and affect : a schema discrepancy model», dans *Environment and Behavior*, Vol. 18, Sage Publications inc., 1986
- PURCELL, A.T., Aesthetics, measurement and control, dans *Architecture Australia*, 73, 1984
- QUEYSANNE, B., «Architectes et/ou ingénieurs, du nom de l'architecte», dans *L'idée constructive*, Picard, Paris, 1987
- QUINTRAND, Paul, *La conception assistée par ordinateur en architecture*, Éd. Hermes, Paris, 1985

- QUINTRAND, P., «Concevoir et dessiner l'architecture...avec une Machine», dans *L'image en architecture "les machines à dessiner"*, Musée d'histoire de Marseille, IIRIAM, Marseille, 1984
- RAY-JONES, A., *Survey of Computer Usage 1989: a summary of the Survey's Principal Finding, Practice (July/august 1990)* RIBA publications, London, 1990
- RIEDL, R., Watz P., *L'invention de la réalité*, Seuil, Paris, 1985
- RITTEL, H., Werber, M., «Dilemmas in a General Theory of Planning», *DMG-DRS Journal*, N.8, 1974
- RIVERO, V., *Une contribution à la conception architecturale assistée par ordinateur : le système Sigma-archi*, thèse de doctorat, Université scientifique et médicale de Grenoble, Grenoble, France, 1977
- RONDELET, J.-B., *Traité sur l'art de bâtir*, Chez A. Rondelet, Paris, 1830
- ROTGÉ, J.-F., *L'arithmétique des formes, une introduction à la logique de l'espace*, thèse de doctorat, Université de Montréal, Faculté de l'aménagement, Montréal, 1997
- ROTGÉ, J.-F., *Proposition pour un système grammatical graphique dédié à la modélisation volumique*, réalisé pour l'institut Canadien de recherche sur les entreprises culturelles, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, Montréal, 1991
- ROUYER, C.-A., «Centre Air Canada, Le théâtre du sport et du spectacle», dans *Le Devoir, cahier Formes*, 3 avril, 1999
- SAKAROVITCH, J., «Architecture et représentation, Géométrie descriptive et Stéréotomie», dans *EAPV, Bulletin d'information de l'École d'architecture Paris-Villemin*, N. 29, Paris, 1998
- SAKAROVITCH, J., «La construction du géométral», dans *Imaginaire technique— Les cahiers de la recherche architecturale*, N.40, Éditions Parenthèses, Marseille, 1997
- SALMON, Pierre, *Histoire et critique*, Éditions de l'Université de Bruxelles, Bruxelles, 1987
- SAURA, J., *Espace dominé, scénographie de la ville*, Éditions de l'Espérou, Les presses Littéraires, Sainte-Estève, 1995

- SAUTERAU, J., «La conception à l'ombre de l'architecture», dans *Concevoir — Les cahiers de la recherche architecturale*, N.34, Éditions Parenthèses, Marseille, 1993
- SCHÖN, D., *The Reflective Practitioner : how professionals think in action*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1982
- SCHWER, R., *Dépendances temporelles, les mots pour le dire*, rapport interne LIPN, France, 1997
- SEMPRINI, A., *L'objet comme procès et comme action. De la nature et de l'usage des objets dans la vie quotidienne*, L'Harmattan, Paris, 1995
- SEVERINO, E., *La Loi et le Hasard*, Petite Bibliothèque Rivages, Paris, 1990
- SGDLTechnology, *Manuel de SGDLsoft*, S.G.D.L. Technology S.A., Lyon, 1995
- SHANNON, C.E., «A Mathematical Theory of Communication», dans *Bell System Technical Journal*, N. 27, U.S.A., 1948
- SHEPPARD, R., Treadgill R., Holmes J., *Paper Houses*, Schocken Books, New York, 1974
- SIEGEL, A.W., White, S.H., «The development of Spatial Representations of large-scale environments», dans Reese, C., *Advances in Child Development and Behavior*, Seminar Press, New York, 1975
- SIMON, H. A., *Sciences des systèmes- Sciences de l'artificiel*, Dunod, Paris, 1991
- SIMON, H. A., «The Structure of Ill Structured Problems», dans *Artificial Intelligence*, N.4, 1973
- SIMON, H., *The Sciences of the Artificial*, MIT Press, Cambridge, Mass, 1969
- SIMONNET, C., «Du mithe algébrique au modèle artisanal», dans *L'idée constructive*, Picard, Paris, 1987
- SINGER, A., «Scegliere di vedere : rendere visibile il fare estetico», dans *La natura della visione*, Edizioni Farhenheit 451, Roma, 1997
- SPERBER, D., «Les sciences cognitives, les sciences sociales et le matérialisme», dans *Introduction aux sciences cognitives*, Gallimard, Paris, 1992
- STINI, G., «Production system and grammars: a uniform characterization», dans *Environment and Planning B*, vol. 7, Pion publication, London, 1980

- SUWA, M., PURCELL, T., GERO, J. S., «Macroscopic analysis of design processes based on a scheme for coding designers' cognitive actions», dans *Design Studies*, V.19 no 4, Elsevier Science Ltd. London, 1998
- TESSIER, R., *Pour un paradigme écologique*, Brèches hurtubise hmh, Québec, 1989,
- THALMAN, *Les systèmes de synthèse et d'animation des images de MIRAlab, Infographie et applications*, Ed. T. Lieblins et H. Röthlisberger, Masson, 1988
- TIDAFI, T., *Moyens pour la communication en architecture — Proposition de la modélisation d'actions pour la figuration architecturale*, thèse de doctorat, Université de Montréal, Faculté de l'aménagement, Montréal, 1996
- TOMBESI, P., «The Carriage in the Needle: Building Design and Flexible Specialisation System», dans *Journal of Architectural Design*, Vol. 52 N.3, Association of Collegiate Schools of Architecture, Washington, DC, 1999
- TORGUET, P., Rubio, F., Gaildrat, V., Caubet, R., *Outils de modélisation en environnement virtuel*, Institut de recherche en Informatique de Toulouse, Toulouse, 1996
- TRIBUS, M., *Décisions rationnelles dans l'incertain*, Éditions Masson, Paris, 1972
- TROUSSE, B., *Coopération entre systèmes à base de connaissances et outils de CAO : l'environnement multi-agent ANAXAGORE*, Thèse de Doctorat de l'Université de Nice Sophia Antipolis, 1989
- TSCHUMI, B., *Disjunctions*, Aedes, Berlin, 1987
- TUFTE, E. R., *The Visual Display of Quantitative Information*, Graphic Press, Cheshire Connecticut U.S.A., 1983
- UPSTILL, S., *The Renderman Companion*, Addison-Wesley Publishing Company, San Raphael CA, 1990
- VAGNETTI, L., *l'architetto nella storia d'occidente*, Teorema edizioni, Firenze, 1973
- VALÉRY, P., *Eupalinos ou l'architecte*, Gallimard, Paris, 1944
- VAN DALEN, D.B., *Understanding educational research*, McGraw-Hill, New York, 1966
- Van NORMAN, Mark, *Computer Aided Database Management and Performance Prediction for Scematic Design*, Berkeley: University of California, 1985
- VARELA, F., *Invitation aux sciences cognitives*, Éditions du Seuil, Paris, 1996

- VARELA, F., *Autonomie et connaissance. Essai sur le vivant*, Éditions du Seuil, Paris, 1989
- VARGAS, C., *Modélisation du processus de conception en Ingénierie des systèmes mécaniques*, Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 1995
- VATTIMO, G. *La fin de la modernité, nihilisme et herméneutique dans la culture post-moderne*, Seuil, Paris, 1987
- VERMERSCH, P. ,La théorie opératoire de l'intelligence appliquée aux adultes, dans *Education permanente*, N.51, Paris, 1979
- VICO,G-B., *Scienza Nuova, Œuvres choisies*, Presses Universitaires de France, Paris, 1946
- VIDAL, P., «From Decision Support Systems to Représentation Support Systems, The cognitive Ecology approach : New perspectives», dans 7th *Mini Euro conference*, Bruges, Belgique, 1997
- VIGNAUX, G., *Les sciences cognitives. Une introduction*, La Découverte, Paris, 1992
- VIOLLET-LE-DUC, E., *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle*, Paris, 1854-1868
- VITRUVIUS, *The Ten Books On Architecture*, translated by Morris Hicky Morgan, Harvard University Press, U.S.A., 1914
- WADDINGTON, C. H., *Behind Appearance*, University Press, Edinburg, 1970
- WATT, A., *Fundamentals Of Three-dimensional Computer Graphics*, Bath Press, Avon,1989
- WATZLAWICK, P., Helmick-Beavin, J., Jackson, D., *Une logique de la communication*, Éditions du Seil, Paris, 1972
- WEBER, M., (1959), *Le savant et le politique*, 10/18, Paris, 1959
- WEISSBERG, J.-L., *Les chemins du virtuel*, Centre de Création Industrielle, Centre Georges Pompidou, Paris, 1989
- WERBER,B., *Les fourmis*, Éditions A. Michel, Paris, 1991
- WINZAPFEL, G., Negroponte, N., «Architecture by Yourself. An Experiment with Computer Graphics for House Design», dans *ACM/SIGGRAPH Proceedings*, Philadelphia, 1976
- YIN, R.K., «*The Case Study as a Serious Research Strategy*», dans *Knowledge*, Volume 3, N° 1, 1981

- ZALLA, T., «Il ruolo cognitivo dell'esperienza nel dibattito tra fenomenisti et rappresentazionalisti», dans *La natura della visione*, Edizioni Farhenheit 451, Roma, 1997
- ZEVI, B., *Apprendre à voir l'architecture*, Les Éditions de Minuit, Paris, 1959
- ZOLLER, J., «Technique informatique appliquée à la représentation du dessin», dans *L'image en architecture "les machines à dessiner"*, Musée d'histoire de Marseille, IIRIAM, Marseille, 1984
- ZOLLER, J., «Modélisation sous contrainte», dans *GAMSAU, Groupe d'études pour l'application des méthodes scientifiques à l'architecture et l'urbanisme*, École d'architecture de Marseille-Luminy, www.gamsau.archi.fr/, Marseille, 1996

ANNEXES

- *Toward an Object-Oriented Language for the Declarative Design of Scenes* (Popov V., Popova, L., De Paoli, G., 1998)



Valentin Popov
University of Poitiers
popov@giotto.univ-poitiers.fr

Lozka Popova
University of Poitiers
popova@giotto.univ-poitiers.fr

Giovanni De Paoli
University of Montreal
depaolig@ere.umontreal.ca

Towards an Object-Oriented Language for the Declarative Design of Scenes

We propose a prototype "kernel" of an object-oriented language, SOML (Scene Objects Modeling Language), intended to assist in the declarative design of scenes in image synthesis. This language is an attempt to provide the designer with a tool to facilitate the rapid prototyping of 3D scenes. It can also serve as a tool for knowledge acquisition and representation, and for communication and exchange of data with other tools in a design environment.

Advantages offered by the implementation of SOML are: (a) from user's viewpoint: the possibility of declarative description of the initial concept associated with the target scene in terms of properties and constraint vocabulary, the possibility of quantitative and qualitative reasoning on these properties, the modification of the intermediate solutions to different levels of detail, the utilisation of previous solutions; and (b) from the implementation viewpoint: the structuring of the properties and methods in the form of domain knowledge, the optimal solution generation according to heuristic causal-probabilistic criteria, the transformation of the semantic concept description of the scene in generic entry code for a geometrical CSG modeler or for rendering and visualization software, the integration of functionality for parameter generation and modification, the compilation of a scene from components of other final scenes and operations of geometrical transformations acting on groups of scenes.

We present the architecture of the object-based implementation of the language and its interpreter, in the unified notation formalism UML. The utilization of the SOML language is illustrated by some examples.

Vers un langage à objets pour la conception déclarative de scènes

Nous proposons un prototype de «noyau» à l'aide d'un langage à objets SOML (Scenes Objects Modeling Language) destiné à aider à la conception déclarative de scènes par la synthèse d'images. Ce langage est une tentative de fournir au concepteur des outils de création rapide de prototypes de scènes 3D. Il peut servir aussi comme moyen d'acquisition et représentation de connaissances, de communication et échange de données avec d'autres outils dans un environnement de conception.

Les avantages offerts par la mise en oeuvre de SOML sont (a) du point de vue utilisateur: la possibilité de description déclarative du concept initial associé à la scène en termes de vocabulaire de propriétés et contraintes, la possibilité de raisonner de manière qualitative et quantitative sur ces propriétés, la modification de solutions intermédiaires à différents niveaux de détail, la réutilisation de solutions anciennes; (b) du point de vue mise en oeuvre: la structuration des propriétés et des méthodes sous forme de connaissances du domaine, la génération de solutions optimales selon des critères heuristiques causal-probabilistes, la transformation de la description des concepts sémantiques de scènes en code générique d'entrée d'un modèleur géométrique CSG (Constructive Solid Geometry) et du logiciel de visualisation, l'intégration des fonctionnalités de génération et modification de paramètres, la compilation d'une scène à partir de composants d'autres scènes finales et d'opérations de transformations géométriques de groupes de scènes.

Nous présentons ensuite l'architecture de l'implantation à objets du langage et son interpréteur, dans le formalisme de notation unifiée UML (Unified Modeling Language). L'utilisation du langage SOML est illustrée par quelques exemples.

introduction

This study is in the scope of research on the creation of tools to assist in the design of scenes in image synthesis. Independent of its particular interpretation, the concept of scene is used in order to represent a finite subset of objects within an application domain, defined formally in the *universe paradigm* (Gomes 1995; Gomes 1996). The notion of design is exploited in different domains of man's activities. It is a concept, associated with the set of creative activities in society (Trousse 1989). Its underlying methodologies face a significant evolution in the domain of mechanical and electrical products manufacturing, and in the field of architecture. In general terms, design is a cyclic process of composition (assembly) stages of complex structures from completely specified components, and the decomposition of structures, the information of which lacks precision. The duration of the design process is usually determined by how long it takes to attain stable solution states.

In image synthesis the objects considered are the components of the scene structure, the construction and representation methods in 3D space, and its attributes. An object is characterized by a geometrical shape of any complexity, together with physical features, which could be represented in a realistic manner on the computer screen as graphical image. In terms of computer representation, the design in image synthesis encompasses various methodologies, integrating geometric models, photometric models, cognitive models and their exploration for the construction and instantiation of various solution classes.

From a cognitive viewpoint, the scenes represent a way of encoding of complex information and its perception, and of reasoning about its unknown aspects belonging to numerous underlying problems. With the growing need for operational models of this type, one notes during their creation and exploration, the existence of one major problem. It is difficult to control the geometric appearance, usual, functional, technological etc. aspects of complex 3D scenes at all the stages of their life cycle. This has led to the development of methodologies based on the creation of CAD tools for design assistance.

The current CAD market is dominated by systems designed for specific applications, having only a limited access to databases (Kehrer 1996). In these design assistance systems, the objects considered are explicit in the case where knowledge of all their parameters is complete, characteristic of a "from-the-ground-up" design. This fact presents a limitation for the designer because he doesn't have the option of exploring partial solutions. Often, in the case of over-constrained problems, it is useful to be able to relax the constraints in the intermediate solutions. These systems are articulated essentially around the geometrical aspect, missing high level semantics better adapted to the thought of a designer. As Charman (1995) underlines it, the geometry is only an artifice of manipulation for a universe with complex semantics.

One step toward the improvement of the design assistance tools is presented by the works dedicated to the creation of declarative CAD (Miaoulis 1996; Colin 1997). The design of scenes by the declarative approach consists in offering ways to express the design needs in linguistic terms at every stage of the design cycle. The creation of a final scene necessitates many repetitive attempts of decomposition of the found solutions (intermediate scenes) into their constituent elements in order to refine them in accord with the goal requirements and new constructions of the scene. It is a process of manipulation of initially unknown semantically rich properties in the cycle description-generation-knowledge understanding (Lucas 1990), the process of declarative design.

Among the numerous problems to be dealt with in this approach, it is necessary to underline the difficulty of optimal management of the number of solutions coherent with the imposed constraints, of providing for the reusability of the experience of other designers, and of developing a user-friendly description and control language, close to the thought of the user and covering all the stages of the design process. A promising approach in order to address these difficulties resides in the development of knowledge based "intelligent" CAD systems. These systems represent a new way to deal with the problem of limited assistance in CAD by integrating design knowledge into the geometri-

introduction

Cette étude s'inscrit dans un cadre de recherche visant la création d'outils d'aide à la conception de scènes en synthèse d'images. Indépendamment de son interprétation particulière, le concept de scène s'utilise toujours pour représenter un sous-ensemble fini d'un de ses domaines d'application, définis formellement dans le paradigme univers (Gomes 1995, 1996).

Ces dernières années, la notion de *conception* est exploitée dans différents domaines d'activités de l'homme. C'est un concept, associé à l'ensemble d'activités créatives dans la société (Trousse 1989). Les méthodologies créées à sa base ont subi une grande évolution dans le domaine de fabrication de produits mécaniques, électroniques et dans le domaine de l'architecture. En termes généraux, la conception est un processus d'enchaînement cyclique d'étapes de composition de structures complexes à partir de composants complètement spécifiés et la décomposition de structures, dont les informations manquent de précision. La durée d'un processus de conception est habituellement limitée par l'aboutissement d'états de stabilité des solutions obtenues.

En synthèse d'images, les objets à concevoir sont les composants de la structure de la scène, des méthodes de construction et représentation dans l'espace 3D et ses attributs. Un objet est caractérisé par une forme géométrique de complexité quelconque, munie de caractéristiques d'apparence physiques, qui peut être représentée de manière réaliste sur l'écran de l'ordinateur sous forme d'une image graphique. En termes de représentation informatique, la conception en synthèse d'images comprend des méthodologies, intégrant des modèles géométriques, modèles photométriques, modèles cognitifs et leurs explorations pour la construction et l'explicitation des classes de solutions.

Du point de vue cognitif, les scènes représentent un moyen de coder l'information complexe, de la percevoir et de raisonner sur ses aspects inconnus faisant partie de nombreux problèmes sous-jacents. Avec le besoin de plus en plus nécessaire de tels modèles performants, on

constate durant leur création et exploration, l'existence d'un problème majeur. Il s'avère difficile de maîtriser l'aspect géométrique, d'apparence, fonctionnel, technologique etc. de scènes complexes 3D à toutes les étapes du cycle de leurs vies. Tous ceci a provoqué l'apparition des méthodologies d'assistance, basées sur la création d'outils CAO d'aide à la conception.

Le marché actuel de la CAO est dominé par des systèmes destinés aux applications spécifiques, n'ayant qu'un accès limité aux bases de données (Kehrer 1996). Dans ces systèmes d'aide à la conception, les objets à concevoir ne sont explicités que dans le cas où les connaissances de tous ses paramètres sont complètes, donnant une conception ascendante. Ce fait présente une limitation pour le concepteur car il n'a pas de possibilités d'explicitier des solutions partielles. Souvent, dans le cas de problèmes sur-contraintes, il est utile de pouvoir contrôler la relaxation des contraintes dans les solutions intermédiaires. Ces systèmes sont articulés essentiellement autour de l'aspect géométrique, manquant de sémantique de haut niveau et aussi l'adaptation à la pensée du concepteur. Comme le souligne Charman (1995), la géométrie n'est qu'un artifice de manipulation d'un univers dont la sémantique est complexe.

Un pas vers l'amélioration de l'assistance est présenté par les travaux dédiés à la création de CAO déclaratives (Miaoulis 1996; Colin 1997). La conception de scènes par l'approche déclarative consiste à offrir des moyens pour exprimer en termes de langage les besoins de chaque étape du cycle de l'évolution du processus de conception.

La création d'une scène finale nécessite de nombreux essais répétitifs de décomposition des solutions trouvées (scènes intermédiaires) aux éléments à raffiner en accord avec les exigences des buts et des nouvelles reconstitutions de la scène. C'est un processus de manipulation des propriétés sémantiquement riches, jamais connues auparavant, dans la boucle description-génération-prise de connaissances (Lucas 1990), ce qui signifie une tâche de conception déclarative. A cause du nombre de problèmes à traiter dans cette approche, il faut souligner la difficulté de gestion optimale du nombre des solutions cohérentes avec

cal models (Kehrer 1996; Vargas 1995; Trouse 1989). The modeling and the exploitation of this knowledge is possible thanks to the couplings of the CAD systems with other advanced computing tools, in particular the coupling of traditional modelers based on object-oriented languages, inference engines, systems of constraint resolution, and methods of qualitative and quantitative reasoning.

With the exception of the work on declarative modeling in Geode (1997), which is dedicated to the problem of scene design within multimedia computer systems, one notes a lack of scientific communications about the use of such systems. The reasons for this lack despite the importance of the topic, are the diversity, complexity and multidisciplinary character of the field. Nevertheless one finds some descriptions of systems and utilities partially covering the needs of the different design stages. These include tools that collect various abilities to facilitate geometric modeling and realistic scene visualization.

Despite the obvious progress of systems for design assistance, one notes some limitations, summarized by Kehrer and Vatterrott: an insufficiently open evolution, a lack of configuration possibility, poor integration capacity, lack of possibility for operational exchange between the systems, lack of capacities of cooperative design, obstacles to the migration of the application domains, absence of modularity, and awkward user interfaces.

The interest of our work lies in the proposition of one methodological support for the creation of a "kernel" of a language integrating tools for synthetic scene design, SOML (Scene Object Modeling Language), based on the "declarative" principle. The goal of the language is to offer functionality to guide the designer in the activities defined by the Model of the Process of Scene Design (MPCS) throughout the different stages of the design cycle. For the definition of the MPCS model we are inspired a great deal by the works of C. Vargas presenting the mechanical design as a tree-like structure made up of tasks/methods (Vargas 1995). In their TROPES System, Genzel and Girard represent the tasks as cognitive units within a system for knowledge representation by multiple-viewpoint objects (Genzel 1997). In the case of syn-

thetic scenes, the MPCS refers to the conceptual and logical models of the scene components and gives the answer to the question of how to design the scene. It allows one to consider the design from a new angle, like being a problem based on hybrid knowledge resolution.

The work we present here is a contribution to current CAD applications' requirements of flexibility, ease of use, possibility of integration with other tools, and functionality. In the sections that follow, we explain the context and essential features of the SOML kernel. Before concluding on the prospects for future research, we present the result of one experiment.

problems of design languages

Language in general, thanks to its power of expression, is a good existing way in man's possession to describe, model and exploit the world. Computer technology today has provided a panoply of languages, varied according to the different needs and working techniques: imperative, functional, logical and lately object-based (Oussalah 1997). In our study we are particularly interested in the implementation of languages capable of offering functionality that could have as its objective the design of scenes, that is, activities of description and knowledge acquisition, generation of parametric solutions and their processing, gaining information by means of visualization, making modifications as necessary, and communication with the environment.

Within the methodology of declarative modeling, for the description of the properties and the constraints according to different points of view, one uses a languages of "scripts." Given this, one obtains descriptions that constitute the external declarative model (Plemenos 1991; Desmontil 1995). These are languages of reduced syntax, structured on some restricted vocabularies, oriented toward modeling. They are restricted to represent only the semantics of selected properties. The internal geometric model, created by a declarative modeler and the process of its exploration (Plemenos 1991; Martin 1989) is coded in terms of imperative universal languages like Pascal, C, or of logical languages (Prolog, Lisp). All these languages present the inconvenience that they can not bring

les contraintes imposées ainsi que la réutilisation de l'expérience d'autres concepteurs et le besoin d'un langage convivial de description et de contrôle, proche de la pensée de l'utilisateur et couvrant toutes les étapes du processus de conception. Une approche prometteuse pour répondre à ces difficultés réside dans le développement de systèmes CAO «intelligents» basés sur les connaissances.

Ces systèmes représentent une voie nouvelle pour aborder le problème d'assistance réduite en CAO en intégrant aux modèles géométriques des connaissances de conception (Kehrer 1996; Vargas 1995; Trousse 1989). La modélisation et l'exploitation de ces connaissances est possible grâce aux couplages des systèmes CAO avec d'autres outils informatiques avancés, parmi lesquels on distingue les cas de couplage des modélisateurs traditionnels basés sur les langages orientés objets, des moteurs d'inférence, des systèmes de résolution de contraintes, des méthodes de raisonnement qualitatif et quantitatif.

Mis à part les travaux de modélisation déclarative Geode (1997), dédiés aux problèmes de la conception de scènes dans le cadre de systèmes informatiques multimédia et la méthodologie de conception à base déclarative, on constate un manque de communications scientifiques pour la mise en œuvre de tels systèmes. Les causes de cet état sont à chercher, malgré l'importance de sujets, dans la diversité, la complexité et le caractère multidisciplinaire du domaine. Néanmoins, on trouve des descriptions des systèmes et des utilitaires couvrant partiellement les besoins d'assistance aux différentes étapes de la conception. Il s'agit de boîtes d'outils regroupant des utilitaires facilitant la modélisation géométrique et la visualisation réaliste des scènes.

Malgré le progrès évident des systèmes d'aide à la conception, on constate ses limites, résumées par Kehrer et Vatterrott comme: l'ouverture insuffisante d'évolution, le manque de possibilité de configuration, la pauvre capacité d'intégration, le manque de possibilité d'échange opérationnel entre les systèmes, le manque de capacités de conception coopérative, l'existence des obstacles pour la migration des domaines d'application,

l'absence de modularité, le manque des interfaces utilisateurs suffisamment conviviales.

L'intérêt de notre travail porte sur la proposition d'un support méthodologique pour la création d'un «noyau» avec un langage intégrant des outils d'aide à la conception de scènes synthétiques SOML (Scene Objects Modeling Language) basé sur le principe «déclaratif». L'objectif du langage est de proposer des fonctionnalités permettant de guider le concepteur à effectuer des activités prévues par le Modèle du Processus de Conception de Scènes MPCSC aux différentes étapes du cycle de vie. Pour la définition du modèle MPCSC, nous nous sommes inspirés des grandes lignes des travaux de C. Vargas présentant la conception en mécanique comme une structure arborescente de tâches/méthodes (Vargas 1995), Genzel et Girard représentant les tâches comme des unités cognitives au sein du système de représentation de connaissances par objets multi-points de vue TROPES (Genzel 1997). Dans le cas de scènes synthétiques, le MPCSC se réfère aux modèles conceptuels et logiques des composants de la scène et donne la réponse à la question comment concevoir la scène. Il permet d'aborder la conception sous un nouvel angle, comme un problème de résolution à base de connaissances hybrides.

Le travail présenté est un effort de contribution aux exigences actuelles des applications CAO de flexibilité, facilité d'utilisation, possibilité d'intégration d'autres outils et fonctionnalités. Dans les sections suivantes, nous exposons le contexte et les caractéristiques essentielles du noyau SOML. Avant de conclure sur les ouvertures à des futures recherches, nous présentons le résultat d'une expérimentation.

problèmes des langages dans la conception

Le langage en général, grâce à son pouvoir d'expression, est le meilleur moyen existant en possession de l'homme pour décrire, modéliser et exploiter le monde. La technologie informatique actuelle a fourni une panoplie de langages, diversifiés selon les différents besoins et techniques de fonctionnement: impératifs, fonctionnels, logiques et dernièrement par objets (Oussalah 1997). Dans notre étude nous nous sommes intéressés particulièrement à la mise en œuvre de

out the modularity and the semantics of concrete concepts presented by the scene models. They remain far from the thought of the designer and the linguistic schemes supported by natural language. They don't permit a comfortable structuring of the domain knowledge, nor the intervening of the designer in the cycle of design evolution.

In the field of product design, there are languages better adapted to the particular needs. For example in the design of mechanical parts we have the use of languages like "Maily" (Trousse 1988), "DDL" (Vargas 1995), "FDL" (Brunetti 1996), "EREP" (Chen 1995), as well as others. There also exists a group of languages designed to model the activities of computer systems in general, independently of the application domain, collecting the methods relevant to their application. The best known are Common KADS, Merise, Graffcet etc. (Vargas 1995). They all have the constraint to be not directly usable for a particular domain.

In terms of knowledge representation and utilization within a system of scenes design assistance (Trousse 1989), the object-oriented paradigm enables the class based structuring of static knowledge (fields of attributes), and of dynamic knowledge (methods). In this context a class determines a generic model that permits the "instantiation" of similar objects. The cognitive aspects of the design assistance systems is partially covered by the languages for knowledge modeling, based on the notion of production rules, semantic networks and frames (SHIRKA, KRL, KI-ONE).

In image synthesis, there are have been developed script-based interpreted languages used for modeling, and the animation of scenes like "Put" (Clay 1996), "Smile" (Argues 91), "Sphigs" (Foley 1995), "Mira" (Thalman 1988), "Fabule" (Gascuel 1996), and of languages giving priority to the visualization like "Pov-ray2" (Dif 1996), "MSDL2" (Gatenby 1993), "RayShade," "Radiance," and "RenderMan." They all were conceived in order to answer to the needs for tools, especially in the research laboratories of computer graphics and mechanical CAD. In all these cases particular formats for graphical data were created (more than 40 different types). The type of the languages is procedural, using as arguments the parameters of the

geometrical primitives. These languages limit to support only some stages of the evolution cycle of the designed objects. In the case of complex scenes, the control on the design parameters, in terms of structuring and of reusability of codes, becomes difficult. In the case of coupling of systems based on knowledge resolution, it is necessary that the design language permit a global support on all the levels of the design process.

In the following section, we show details of the philosophy of integration, in one specialized scene design language, of a functionality permitting the designer to create from solid primitives a CSG-constituted synthetic 3D scene, to represent the methods of its assembly and modification in terms of methodical and causal probabilistic knowledge, and to interact with the environment or other scenes. The causal-probabilistic solution allows one to introduce the concept of hypothetical covering, reflecting the non-determinist nature of the possible semantic interpretation associated with the properties related to the concept of the target scene. In this context, the result of the constraint resolution is the choice of one subset of coverings (set of instance parameters) relevant to the constraints for direct causes, sorted according to the criterion of maximal likelihood (Peng 1990).

For the conceptualization of a system we adopted the UML formalism (Lai 1997), becoming a standard for the biggest publisher of industrial object-oriented software. The formalism of object UML modeling was created by the OMG Association with the goal of unifying the best existing methods of analysis and object-oriented design. This formalism is the most advanced one at present, and it makes possible the elaboration of conceptual and logical models of complex systems.

structure and main aspects of SOML

The approach adopted in the choice of SOML structure is a hierarchical layering of the functionality, implemented in the context of a design-assistance environment (Figure 1. UML-diagram of the object-oriented conceptual model of SOML).

The components of the environment are accessible by means of UNIX shell processes. One distinguishes the following layers: knowledge, mod-

langages capables de proposer des fonctionnalités qui puissent avoir comme objectif la conception de scènes, c'est-à-dire, des activités de description et l'acquisition de connaissances, la génération de solutions paramétrées et leurs instances, la prise de connaissance par visualisation, la modification en cas de besoin, la communication avec l'environnement.

Au sein de la méthodologie de modélisation déclarative, pour la description des propriétés et des contraintes selon différents points de vue, on utilise des langages à «scripts», grâce auxquels on obtient des descriptions qui constituent le modèle déclaratif externe (Plemenos 1991; Desmontil 1995). Ce sont des langages à syntaxe réduite, bâti sur des vocabulaires restreints, orientés vers la modélisation. Ils se limitent à représenter la sémantique des propriétés visées. Le modèle géométrique interne, créé par un modéleur déclaratif et le processus de son exploration (Plemenos 1991; Martin 1989) sont programmés en termes de langages impératifs universels comme *Pascal*, *C*, ou de langages logiques (*Prolog*, *Lisp*). Tous ces langages présentent l'inconvénient de ne pas pouvoir dégager la modularité et la sémantique des concepts concrets présentés par les modèles des scènes. Ils restent loin de la pensée du concepteur et des schémas linguistiques supportés par le langage naturel. Ils ne permettent pas une structuration aisée des connaissances du domaine, ni l'intervention du concepteur dans le cycle d'évolution de la conception.

Dans le domaine de conception de produits, nous trouvons des langages mieux adaptés aux besoins particuliers. Par exemple dans la conception en génie mécanique nous avons la mise en œuvre de langages comme «Maily» (Trousse 1988), «DDL» (Vargas 1995), «FDL» (Brunetti 1996), «EREP» (Chen 1995), et bien d'autres.

Il existe également un groupe de langages conçus pour modéliser les activités d'un système informatique en général, indépendamment du domaine, regroupés selon les méthodes de leurs application. Les plus connus sont Common KADS, Merise, Graffcet, etc. (Vargas 1995). Ils ont tous la contrainte de ne pas être utilisables directement pour un domaine particulier.

En termes de représentation et utilisation de connaissances au sein d'un système d'aide à la conception de scènes (Trousse 1989), le paradigme orienté objets permet la structuration, sous forme de classes d'objets, des connaissances statiques (champs d'attributs de propriétés) et de connaissances dynamiques (méthodes). Dans ce contexte une classe détermine un modèle générique qui permet «l'instanciation» d'objets similaires. Les aspects cognitifs des systèmes d'aide à la conception sont partiellement couverts par les langages de modélisation des connaissances, basés sur la notion de règle de production, réseaux sémantiques et frames (SHIRKA, KRL, KL-ONE).

En synthèse d'images, se développent des langages interprétés par des «scripts» utilisés pour la modélisation et l'animation de scènes comme «Put» (Clay 1996), «Smile» (Argues 1991), «Sphigs» (Foley 1995), «Mira» (Thalman 1988), «Fabule» (Gascuel 1996), et des langages donnant priorité à la visualisation comme «POV-Ray» (Dif 1996), «MSDL» (Gatenby 1993), «RayShade», «Radiance», «RenderMan». Ils ont été conçus afin de répondre aux besoins d'outils, surtout dans les laboratoires de recherche, d'infographie et de CAO en mécanique. Dans tous ces cas, ils ont aussi été créés avec des formats de données graphiques particulières (plus de 40 types différents). Ces langages sont de type procédural, utilisant comme arguments les paramètres des objets-primitives géométriques. Ces langages se limitent à ne supporter qu'à certaines étapes du cycle d'évolution des objets en conception. Dans le cas de scènes complexes, le contrôle sur les paramètres de la conception, en termes de structuration et de réutilisation du code, devient difficile. Dans le cas de couplage de systèmes de résolution à base de connaissances, il est nécessaire que le langage de conception permette un support global sur tous les niveaux de la conception.

Dans la section suivante nous montrons des détails sur l'idéologie d'intégration, dans un langage spécialisé pour la conception de scènes 3D, des fonctionnalités permettant au concepteur de créer des primitives de solides CSG constituant une scène synthétique, de représenter les méthodes de son assemblage et modification en termes de

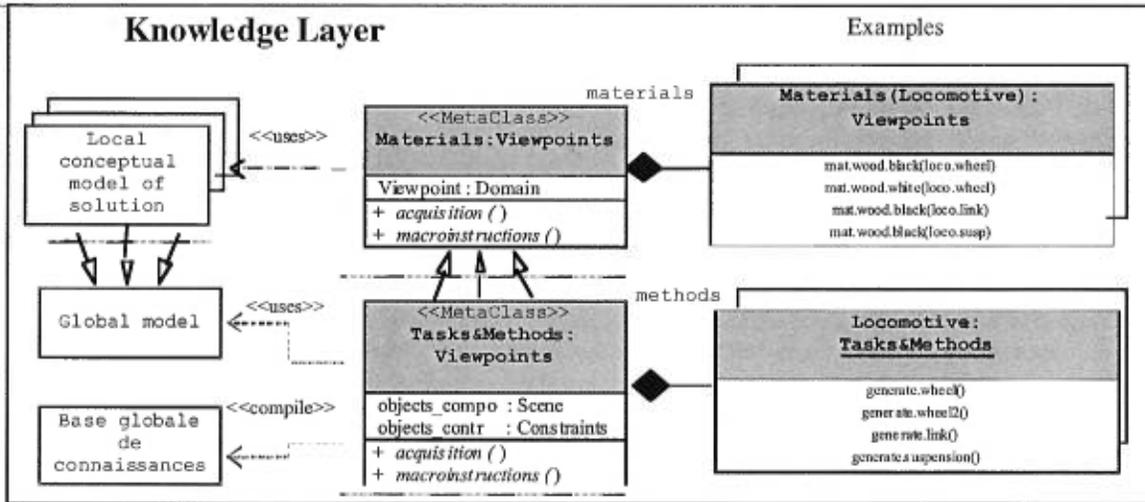


Figure 1a. Classes and instances of knowledge representation (multiple-viewpoint classification).

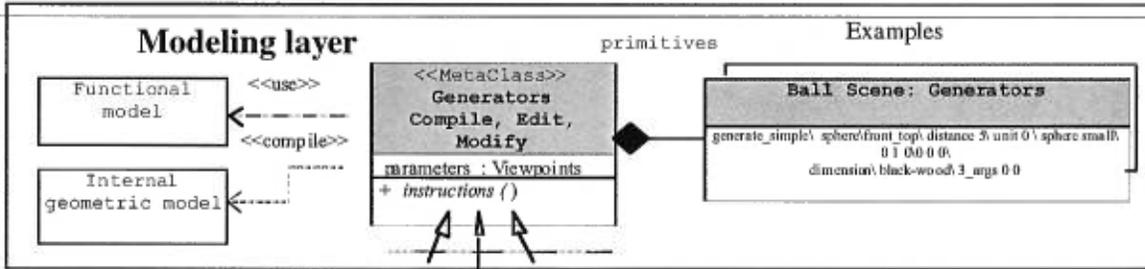


Figure 1b. Classes and instances of geometric modeling and of the photo-realistic aspect (Methodological knowledge).

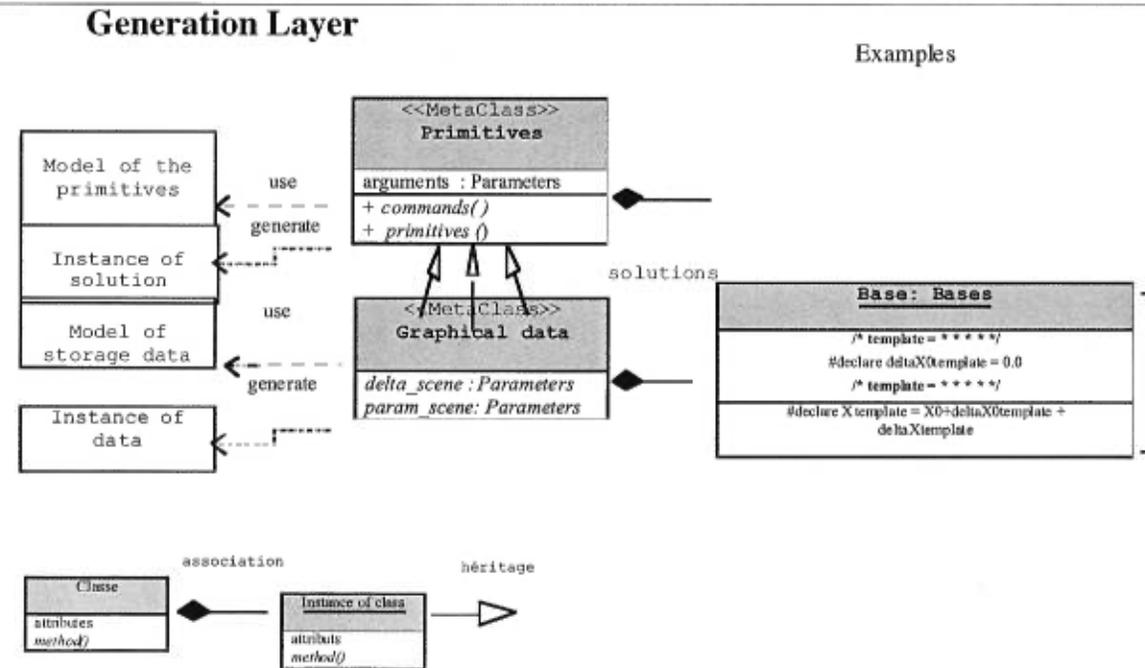


Figure 1c. Classes and instances of classes and instances of solution prototypes (satisfaction of constraints).

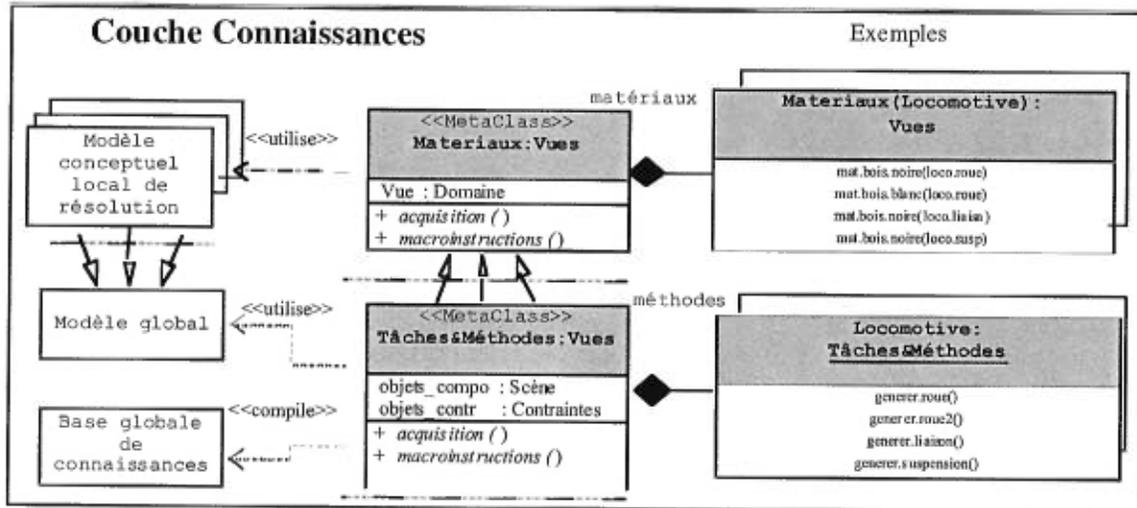


Figure 1a. Classes et instances de représentation des connaissances (classification multi-vues).

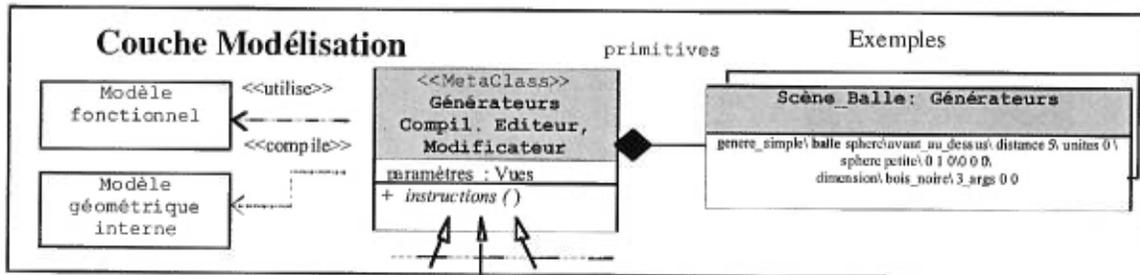


Figure 1b. Classes et instances de modélisation géométrique et de l'aspect photo réaliste (connaissances méthodologiques).

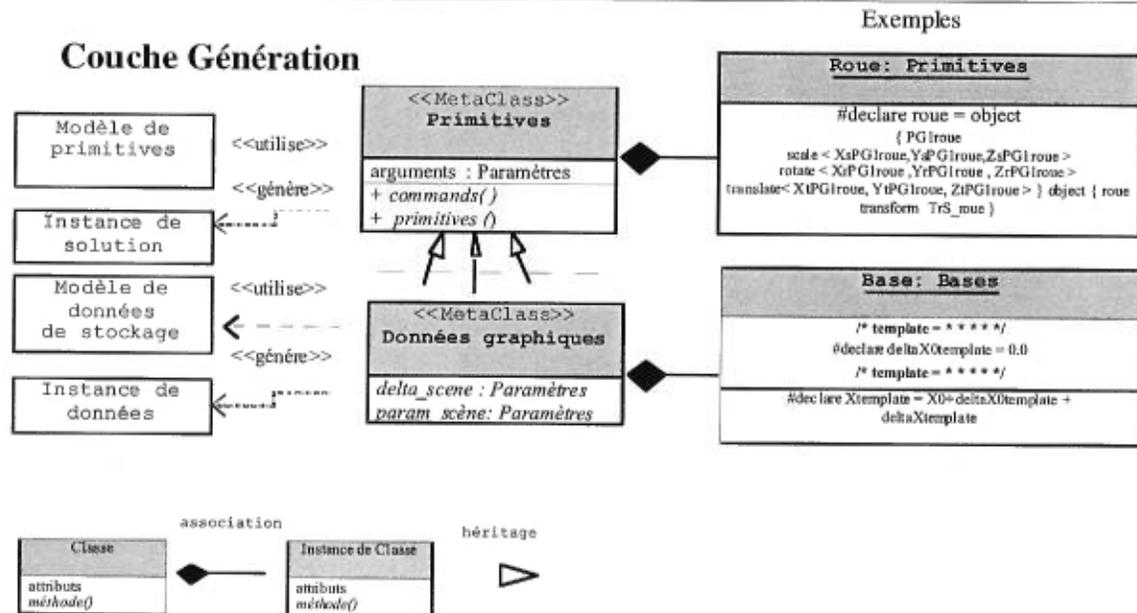


Figure 1c. Classes et instances de solutions - prototypes (résolution de contraintes).

eling, and generation. These will be presented in this chapter. The functionality supported by SOML revolves around the three principal phases of the iterative design process; description, model generation and information gathering. This functionality is intended for the creation of cognitive geometric models with a realistic appearance, and the generation of solutions (instances). It includes actions performed on the objects constituting the design assistance environment. The principal actions are: representation, compilation, modification, duplication, classification, and inference. Each action is described in terms of macro-instructions, instructions, SOML commands and arguments; structures according to a multi-layer hierarchy, to be described below.

A real or virtual scene can be described as a Sy system with different states—initial, intermediate, or final. Such a system is capable of transforming a set of properties observed upon entry into a new set of properties observed upon exit. These properties resemble constraints when they are of a geometric, mechanical, topological, or other nature. There is often a fine line between the notions of properties and constraints. We distinguish two types of properties: those which are explicitly stated by the designer, and those which are implicit, i.e. related to a particular domain of application and are not stated during the action of description. The activity of description is a process of acquisition and external representation (external declarative model) of the properties and constraints on the objects constituting the scene (and on the scene itself). This activity is expressed by a set of conjunctions of natural statements. The linguistic schemes used are based on unary and binary relations. A statement, for example, is a disjunction of pairs (attribute_identifier, value), and triples (target_attribute_identifier, value, reference_attribute_identifier), where these attribute identifiers are described by means of a limited vocabulary derived from natural language (Figure 15) and adapted to each specific case (Plemenos 1991; Lucas 1996; Desmontils 1995). The statement expresses the semantics of the property under consideration.

In terms of cognitive units, the properties are represented (action of representation) by means of

classes and instances, and structured in terms of viewpoints and causal relations. The knowledge is of a hybrid type due to its heterogeneous nature (symbolic, qualitative and quantitative, causal, probabilistic). After structuring the information about the scene domain, it becomes possible to infer (action of inference) non-explicit information from it. This information is available in the knowledge database and consists of solutions in terms of coverings, introduced by Peng (1990). These solutions (coverings) represent the semantic cognitive aspect of the final solutions, produced during the activities of compilation and generation.

The action of compilation consists in the transformation of information (views, classes of properties, and causal relations) into models (geometric, photometric, functional, of construction methods, and others) in keeping with the semantics of "multiple viewpoints." The action of generation produces instances of stable solutions. The solution of a scene is the set of instances of classes of the scene's properties, created by a concrete method of construction, and satisfying the imposed constraints. In terms of data, a solution is the set of qualitative and quantitative values attained by the parameters of the construction method. Each solution is named after its construction method, and numbered based on the order in which it was created. The number of solutions can be very big, and in that case it is suitable to classify them in terms of the acceptance interval for the values of the parameters. In this manner we generate classes of solution prototypes, to be used by default. This classification sheds light on the knowledge base of hybrid, multi-viewpoint information with respect to a new solution.

The solution of a problem in declarative design is based on the integration of an analytic learning method (supported by the causal-probabilistic model, CPM) and a hybrid method of spatial constraint resolution. The causal-probabilistic model, proposed by Peng (1990) and generalized by Dubois (1995) offers analytic and probabilistic learning formalisms. This learning consists in acquiring methodological knowledge by means of few examples, often alone, and a very rich theory of the domain. The resolution of spatial constraints is a necessary activity for the instantiation of topo-

connaissances méthodologiques et de résolution causale-probabiliste et d'interagir avec l'environnement ou d'autres scènes. La résolution causale-probabiliste permet d'introduire les concepts de couverture hypothétique reflétant la nature non déterministe de l'interprétation des sémantiques possibles associées aux propriétés couvrant le concept d'une scène cible. Dans ce contexte, le résultat de la résolution est le choix d'un ensemble de couvertures (ensemble de paramètres) pertinentes aux contraintes de causalité directe, triées selon un critère de vraisemblance maximale (Peng 1990).

Pour la conceptualisation du système nous avons adopté le formalisme Unified Modeling Language-UML (Lai 1997), devenu un standard pour les plus grands éditeurs de logiciels industriels dans la modélisation objet. Le formalisme de modélisation objet UML est créé par l'association Object Management Group-OMG avec le souci d'unifier les meilleures méthodes existantes dans l'analyse et la conception orientée objets. Ce formalisme est le plus évolué à l'heure actuelle et il permet l'élaboration des modèles conceptuels et logiques dans un environnement de systèmes complexes.

Structure et aspects principaux du SOML

La solution adoptée pour le choix d'architecture de SOML est la structuration hiérarchique multicouche des fonctionnalités, implantées dans le contexte d'un environnement d'aide à la conception (Figure 1. Diagramme UML du modèle conceptuel des dépendances classes/instances du langage SOML).

Les composants de l'environnement sont accessibles par l'intermédiaire de processus Unix et le shell de ce système d'exploitation. On distingue les couches Connaissances, Modélisation et Génération présentées dans ce chapitre. Les fonctionnalités supportées par SOML s'articulent autour des trois principales phases, constituant les étapes du processus itératif de conception : description, génération et prise de connaissances (Lucas 1990). Ces fonctionnalités visent la construction des modèles cognitifs, géométriques, d'apparence réaliste et la génération d'instances-solutions. Elles incluent des activités exécutées sur

les objets constituant l'environnement d'aide à la conception. Les activités principales sont description, représentation, compilation, modification, clonage, classification, inférence. Chaque activité est représentée en termes de macroinstructions, instructions, commandes et arguments SOML, structurés dans une hiérarchie multicouche, détaillée plus loin.

Une scène réelle (ou virtuelle) peut être représentée comme un système Sy avec des états différents - initial, intermédiaire ou final. Un tel système est capable de transformer un ensemble de propriétés affectées à son entrée dans un nouvel ensemble de propriétés observées à sa sortie. Ces propriétés s'apparentent beaucoup à des contraintes lorsque celles-ci sont géométriques, topologiques, mécaniques ou autres. Souvent la frontière entre les notions de propriétés et contraintes est particulièrement floue. Nous distinguons deux types de propriétés: celles qui sont explicitement énoncées par le concepteur et celles qui sont implicites, c'est-à-dire liées au domaine d'application et ne sont pas déclarées pendant l'activité de description.

L'activité *description* est un processus d'acquisition et de représentation externe (modèle déclaratif externe) des propriétés et des contraintes sur les objets physiques qui composent la scène (et sur la scène elle-même). Cette activité s'exprime comme un ensemble de conjonctions de phrases naturelles. Les schémas linguistiques utilisés sont basés sur des relations unaires et binaires. Une phrase par exemple est une disjonction de couples (identificateur_d'attribut, valeur) et de triples (identificateur_d'attribut_cible, valeur, identificateur_d'attribut_référence) où les `identificateur_d'attribut`, `identificateur_d'attribut_(référence ou cible)` sont dénotés par un vocabulaire restreint spécialisé du langage naturel (Figure 16) adopté pour chaque cas concret (Plemenos 1991; Lucas 1996; Desmontils 1995). La phrase exprime la sémantique de la propriété visée.

En termes d'unités cognitives, les propriétés sont représentées (activité *représentation*) par classes et instances, structurées en «vues» et relations de causalité (Couche Connaissances). Les

logical models of spatial configuration, and is based on spatial-temporal logic (Allen 1983, Donikian 1992).

The paradigm for our approach to solving design problems can be summarized by the following rules:

- R1: *If the designer does not know how to construct the scene, then the new solution = inference from the most similar existing solution + duplication of the most similar existing solution + eventual modification.*
- R2: *If the designer knows how to construct the scene, then the new solution = description + representation + compilation + generation + classification.*

The duplication (or "cloning") operation has the aim of deriving a "generic" copy of the method of construction of the scene or its parts referenced in terms of the most similar existing solution and its instantiation. The copy is reinstantiated as a new solution in a new context (the referenced welcome scene). The new solution is renamed and can be subsequently modified. For example, the intermediate scene "hub" of Figure 18 created by the method "generate_hub" and shown in Figure 18, is derived from the intermediate scene "wheel" and modified locally without affecting the rest of the scene in terms of the properties "dimensions" and "photometric aspects." The search for existing solutions and the test for similarity is effected with the help of decisional (causal-probabilistic) heuristics, and remains outside the scope of this work.

design environment

The environment of the assisted design constitutes the application context of the SOML language. Its architecture is founded on the coupling of an extended geometrical modeler (MoCSG), an interpreter (ISOML) of programs (PgSOML), a module of knowledge treatment (TrCo), a graphical user interface (IGU), the software of visualization POV-Ray (RePov), and the data bases: knowledge data (BaCo), graphic data (DoGra), picture data (Dolm) and the Unix shell.

The architecture of the environment is conceived in view of providing declarative modeling

of scenes, using strategies and techniques of qualitative reasoning and causal probabilistic heuristics. The reasoning task concerns the obtaining of an answer to questions about the composition (e.g., what are the components of a scene?), the geometry (e.g., which is the scene with the given proportions?), the spatial configuration (e.g., what are the possible configurations in the available space?) and the realistic aspect of some scenes (e.g., which are the scenes with the given appearance?).

The coupling of the tools accomplished through data exchange actions. This provides the advantages of management and modular manipulation of data through the language in using knowledge based optimization strategies. In the following paragraphs we present the conceptual context and the architecture of the kernel SOML language. They are specified in terms of conceptual and logical models, expressed by classes and their associations, in the conceptualization formalism UML.

knowledge layer and MCR

At this level of the hierarchy, the functionality is defined according to MCR (Model of Conceptual Resolution). This model is build on the basis of concepts stemming from the OBR (Objects-based representation) formalism of object oriented modeling of domain knowledge by multiple views (Caponi 1995, 1997) and the MCP (Causal probabilistic model) model of reasoning based on the application of the causal probabilistic strategies of resolution.

According to MCR, a scene is viewed as a cognitive model of a designed world. The properties and the constraints of the scenes and also the methods of their treatment, are defined as cognitive objects—units of knowledge. They constitute the domain knowledge according to the different points of view of the scene. The knowledge is structured on the basis of the object oriented formalism OBR, defined by the SHIRKA-TROPES methodology (Caponi 1995; Gensel 1997; Schmelzter 1995). The MCR formalism permits the enumeration and the attachment of properties to the objects of the scenes and the application of strategies for resolution defined by MCP.

Multiple points of view, classes, instances and

connaissances sont de type hybride due à sa nature hétérogène (symbolique qualitative et quantitative, causale et probabiliste). Après la structuration des connaissances du domaine des scènes, il devient possible d'en inférer (activité inférence) des informations non explicites, disponibles dans la base de connaissance, à savoir des solutions en termes de couvertures, introduit par Peng (Peng 1990). Ces solutions (couvertures) représentent l'aspect sémantique cognitif des solutions finales, produites pendant l'activité compilation et génération.

L'activité compilation consiste à la transformation des connaissances (vues, classes de propriétés et relations de causalité) sous formes de modèles: géométriques, d'apparence photométrique, méthodes de construction, fonctionnels, et d'autres conformes aux sémantiques des «vues». La génération produit des instances de solutions consistantes. La solution d'une scène est l'ensemble des instances des classes des propriétés de la scène, créées par une méthode concrète de construction, étant consistantes avec les contraintes imposées. En termes de données, une solution est l'ensemble des valeurs quantitatives et qualitatives affectées aux paramètres de la méthode de construction. Chaque solution est nommée par le nom de sa méthode, énumérée par le numéro d'ordre de la génération. Le nombre des solutions peut être très grand et il est convenable de les classer par l'intervalle d'acceptation pour les résultats de l'évaluation des propriétés paramétriques. De cette manière nous allons générer des classes de prototypes solutions, utilisées par défaut. La classification met à jour la base de connaissances hybrides multi-vues par rapport à une nouvelle solution.

La résolution d'un problème de conception déclarative est basée sur l'intégration d'une méthode analytique d'apprentissage (supportée par Causal probabilistic Model CPM) et une méthode hybride de résolution des contraintes spatiales. Le modèle causal probabiliste CPM, proposé par (Peng 1990) et généralisé par (Dubois 1995) offre des formalismes d'apprentissage analytique et probabiliste. Cet apprentissage consiste à apprendre des connaissances méthodologiques à travers peu d'exemples, souvent un seul, et une très riche théorie du domaine. La résolution de

contraintes spatiales est une activité nécessaire pour l'instanciation des modèles topologiques de configuration spatiale et s'appuie sur le raisonnement spatio-temporel issu de la logique (Allen 1983; Donikian 1992).

Le paradigme de notre approche de résolution du problème de conception s'exprime par les règles suivantes :

- R1: Si le concepteur ne sait pas comment construire la scène, alors la nouvelle solution = inférence de la solution existante, la plus similaire + clonage de la solution existante, la plus similaire + éventuelle modification.
- R2: Si le concepteur sait comment construire la scène, alors la nouvelle solution = description + représentation + compilation + génération + classification.

L'opération clonage vise la dérivation d'une copie "générique" de la méthode de construction de la scène (ou une partie de la scène) référencée comme solution existante et son instance la plus similaire. La copie sera réinstanciée comme une nouvelle solution dans un nouveau contexte (la scène d'accueil référencée). La nouvelle solution sera renommée et peut subir des modifications éventuelles. Par exemple la scène intermédiaire "scène hublot" de la Figure 17 créée par la méthode "génère.hublot," montrée dans l'image sur la Figure 19, est dérivée de la scène intermédiaire "scene_roue" et modifiée (activité de modification locale sans affecter le reste de la scène) selon les points de vue "dimensions" et "aspect photométrique". La recherche de solutions existantes et le test de l'évaluation de la similarité s'effectue à l'aide d'heuristiques décisionnelles (causales probabilistes) reste au dehors de l'intention de ce travail.

Environnement

L'environnement d'aide à la conception constitue le contexte d'utilisation du langage SOML. Son architecture est fondée sur le couplage d'un modèleur géométrique CSG (MoCSG) régularisé et étendu, un interpréteur (IntpSOML) de programmes (PgSOML), un module de traitement des connaissances (TrCo), une interface graphique

```

Concept_of_scene ::= viewpoints
viewpoints      ::= type_of_composition | classes_of_attributes
type_of_composition ::= simple | complex
simple           ::= component [ context ]
complex        ::= collection | primitive GM [context ]
context        ::= reference_point | observation | lighting | simple | complex
collection     ::= { component }
component      ::= name id primitive GM
classes_of_attributes ::= viewpoint_properties viewpoint_methods viewpoint_constraints
viewpoint_properties ::= classes_spatial_configuration classes_causal_probabilistic_knowledge ...
viewpoint_methods   ::= classes_geometric_constraints | classes_numeric_intervals |
viewpoint_constraints ::= classes_spatial_intervals | classes_constraint_size

```

Figure 2. BNF definition of the OBR scene concept.

OBR. The universe of the scene is represented by a collection of cognitive objects structured hierarchically by class, instances and multiple points of view. These objects are autonomous, characterized by the object-oriented knowledge representation OBR. A generic family of objects itself is modeled by a concept, subdivided according to different points of view (Figures 1-3). The objects communicate between themselves and the environment by the help of data exchange interfaces in a special unified format for all types of designed scenes.

In terms of data the classes of properties (including the constraints) can be likened to the fields (members) of a structure. The range of possible values for the fields is defined in the space of primitive types (integers, reals, character strings, or structured data types). The objects are considered from different "viewpoints." Each viewpoint determines a set of fields visible from it. For example, the scene can be regarded as a complex geometric shape (Geometric Class of Shapes), as an object located at a precise point of space (Spatial Configuration viewpoint), as a structure composed of objects from other scenes (Class of Composition), etc. This multiple-viewpoint approach has the advantage of a local grouping of the properties classes relevant to a particular vision of the designer, in conformity with his area of expertise. The classes of instances of concepts making up a "viewpoint" are hierarchically-structured.

This procedure presents the advantage of a local and distributed approach, allowing for parallel and cooperative design of scenes. The classes are hierarchical (in terms of the relation of special-

ization) and can be instantiated at different levels of the hierarchy. This characteristic makes it possible to simplify the modeling phase of a design session, the price being a loss of details (Plemenos 1996b) A possible inference goal could be knowledge classification, i.e. finding the class of an object of which one knows an instance. The "Methods" point of view, for example, regroups the different methods used in constructing the components of a domain. These methods make up the hierarchies of resolution tasks in terms of methodological knowledge.

Causal probabilistic knowledge and MCP. The causal-probabilistic model describes the causal relations existing among units of knowledge, denoted by the terms "causes" and "effects" (manifestations). Causal knowledge is "deeper" than the heuristic knowledge used by a designer to solve a problem. The Sy system corresponding to a description has definite states defined by n-tuples of binary attributes (Dubois 1995). According to this system, if $a_i = 1$, there are manifestations m_i ; and if $a_i = 0$, they are absent. If there are no manifestations present, we say that the system is in its normal (initial) state and can be described by n-tuples of the form $(0, \dots, 0)$.

Let M denote a set of n possible manifestations (m_1, \dots, m_n) . Let D denote the set of direct causes of these manifestations (d_1, \dots, d_n) . A cause can be present or absent. To each d_i is associated a set effects $\{d_i\}$ of manifestations which are a consequence of the presence of the causes d_i . The relation R on $D \times M$ is defined as $(d_i, m_i) \in R \Leftrightarrow m_i \in \{d_i\}$. And this associates the manifestations

<i>Concept_of_scene</i>	::=	<i>vues</i>
<i>view</i>	::=	<i>type_de_composition / classes_d'attributs</i>
<i>type_de_composition</i>	::=	<i>simple / complexe</i>
<i>simple</i>	::=	<i>composant [contexte]</i>
<i>complexe</i>	::=	<i>collection / primitive_GM [contexte]</i>
<i>contexte</i>	::=	<i>repère / observation / illumination / simple / complexe</i>
<i>collection</i>	::=	<i>[composant]</i>
<i>composant</i>	::=	<i>name id_primitive_GM</i>
<i>classes_d'attributs</i>	::=	<i>vue_propriétés vue_méthodes vue_contraintes</i>
<i>vue_propriétés</i>	::=	<i>classes_configuration_spatiale classes_causales_probabilistes</i> <i>classes_aspect_réaliste_dimension_et_mesure classes_primitives_géométriques_et_déformations</i>
<i>vue_méthodes</i>	::=	<i>classes_génération_de_modèle_paramétrique / classes_d'édition_et_modification /</i> <i>classes_inférence_causale / classes_satisfaction_de_contraintes</i>
<i>vue_contraintes</i>	::=	<i>classes_contraintes_géométriques / classes_intervalles_numériques /</i> <i>classes_intervalles_spatiales / classes_contraintes_taille</i>

Figure 2. Définition BNF du concept de scène selon OBR.

utilisateur (IGU), le logiciel de visualisation–rendu d'images POV-Ray (RePov), et les bases de données: connaissances (BaCo), données graphiques (DoGra), données images (Dolm) et le shell Unix.

L'architecture de l'environnement est conçue en vue de fournir des moyens nécessaires pour l'application de l'approche de modélisation déclarative dans la conception de scènes, en utilisant des stratégies et des techniques de raisonnement qualitatif et des heuristiques exploratoires causales-probabilistes. Le but du raisonnement concerne l'obtention d'une réponse aux questions sur la composition (par ex. Quelles sont les composants d'une scène ?), la géométrie (p. ex. Quelle est la scène avec les proportions données ?), la configuration spatiale (par ex. Quelles sont les configurations possibles dans l'espace disponible ?) et l'aspect réaliste des scènes (par ex. Quelles sont les scènes avec l'apparence donnée ?).

Le couplage des outils est fait à base d'actions d'échange de données. Celui-ci offre les avantages d'une gestion et manipulation modulaire des données par l'intermédiaire du langage en utilisant des stratégies d'optimisation basées sur les connaissances causal probabilistes. Dans les paragraphes suivants nous présentons le support théoriques du contexte conceptuel et l'architecture du langage SOML. Ils sont spécifiés en termes de modèles conceptuels et logiques, exprimés par classes à objets et leurs associations. Le formalisme de représentation choisi est l'utilisation des diagrammes conceptuels UML.

Couche connaissances et CRM

A ce niveau de la hiérarchie, les fonctionnalités sont définies conformément au modèle conceptuel de résolution CRM (Conceptual Resolution Model). Ce modèle est construit sur la base de concepts issus du formalisme objet orienté multi-vues OBR (Objects based representation) de modélisation de connaissances du domaine (Caponi 1995) et du modèle de raisonnement basé à l'application des stratégies de résolution causal probabiliste CPM.

Selon CRM, une scène est vue comme un modèle cognitif du monde de la conception. Les propriétés et les contraintes des scènes mais aussi les méthodes de leur traitement, sont définies comme des objets cognitifs–unités de connaissance. Ils constituent les connaissances du domaine selon les différents points de vue sur la scène. Les connaissances sont structurées à base du formalisme OBR définie par la méthodologie SHIRKA-TROPES (Caponi 1995; Schmeltzer 1995). Le CRM permet l'énumération et l'attachement de propriétés ou des contraintes aux objets des scènes et l'application de stratégies de résolution définies par CPM.

Le multi point de vue, classes, instances et OBR. L'univers de la scène est représenté par une collection d'objets cognitifs structurés hiérarchiquement par des classes, des instances et des multi-points de vue. Ces objets sont autonomes, caractérisés par une représentation de ses connaissances orienté objets. Une famille générique d'objets se modélise par un concept, partitionné en différents points de vue (Figures 1-3). Les objets communiquent entre eux et l'environnement par le

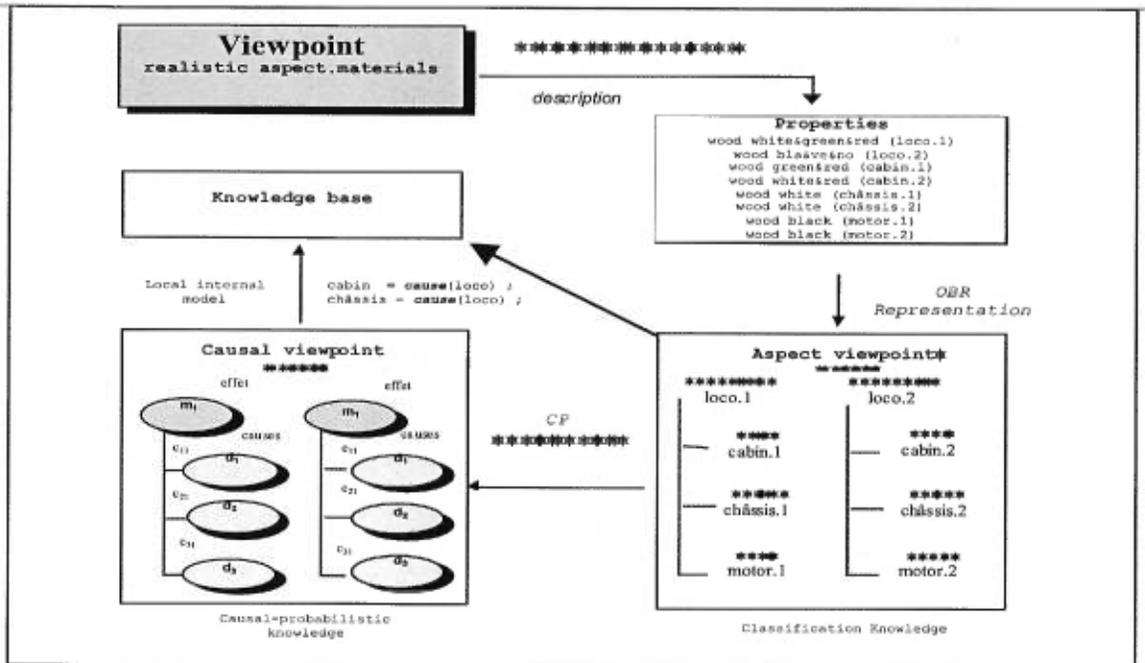


Figure 3. Example of creation of a local base of hybrid knowledge (view "materials", scene "locomotive").

with the causes.

For a Sy system there are various possible schemes of semantic associations, allowing one to obtain different types of solutions. For example, if one is interested in representing the taxonomy of the scenes based on their different properties, it is appropriate to associate to the manifestations M the concepts of properties (or property attributes), and to the causes D , the concepts of scenes possessing these properties. All this expresses the fact of having one class of properties due to the existence of scenes characterized by these properties.

Given a set $M+$ representing the set of properties that are present (described or required), the solution to a design problem consists in finding the scene having these properties. We define the set $M^- = M - M^+ = \neg M^+$, to be the set of properties that are not present, that is, all the manifestations present are observable. The mode of abductive reasoning used here allows us to look for possible causes (e.g. scenes) explaining or justifying the effects (eg. the properties) observed. In other words, we look for explanations in terms of possible existing scene solutions for the set of properties required

for the design.

For each "view" of the scenes one creates a local knowledge base, represented by a bipartite graph with two types of nodes: the nodes d_i representing the direct causes of the effects m_j and the nodes of the effects m_j (Figures 3, 5). To the edges joining the two types of nodes are associated probabilistic weights c_{ij} (strength of causality) reflecting domain knowledge in terms of normalized numeric values in the interval $[0, 1]$. For example they can be the frequency of occurrence of the cognitive concept of a scene property in an event (scene present). The basis is completed by the addition of a priori probabilities of the existence of the causes d_i in a domain.

Probabilistic knowledge about a domain is used to calculate a criterion named "measure of likelihood", which makes it possible to evaluate the plausibility of the different hypotheses about potential solutions in terms of coverings. As mentioned above, it is possible to have other semantic associations between the two types of nodes of Figure 3. The nodes d_i for the direct causes, instead of representing scenes, could represent prop-

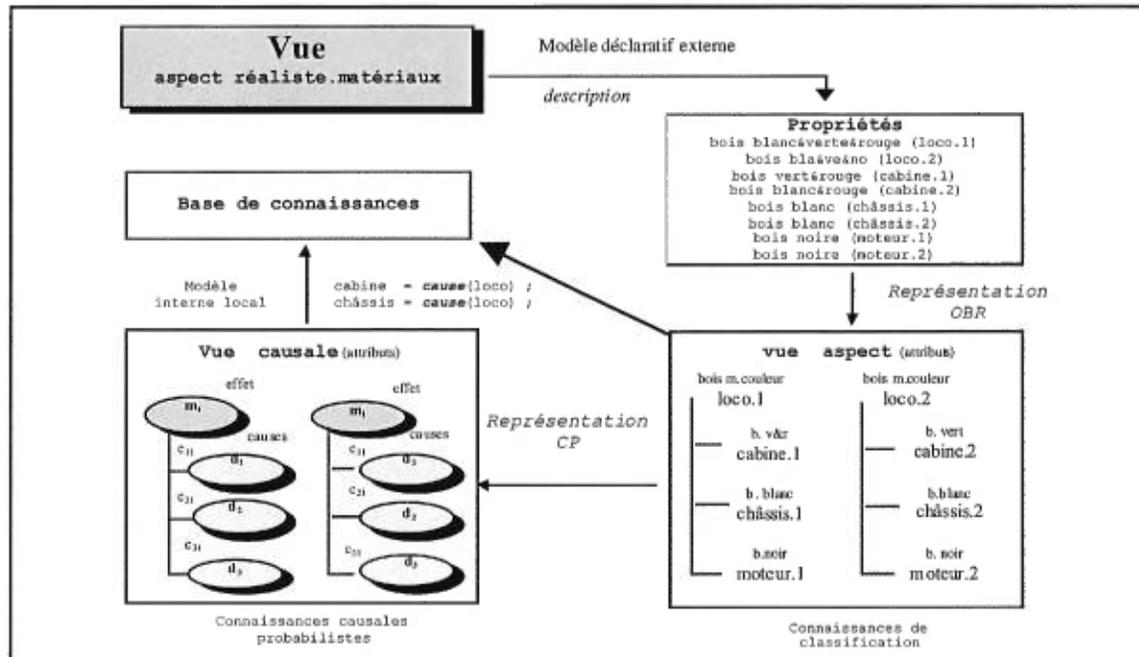


Figure 3. Exemple de création d'une base locale des connaissances hybrides [Vue "Matériaux", scène "locomotive"].

biais d'interfaces d'échange de données dans un format particulier unifié pour tous les types de scènes conçues.

En termes de données, les classes des propriétés (les contraintes incluses) peuvent être assimilées aux champs d'une structure. Les domaines des valeurs des champs sont définis dans l'espace des types de primitives (entiers, réels, chaînes de caractères ou de types structurés). Les objets sont vus de différents «points de vue». Chaque point de vue détermine un ensemble de champs visibles par celui-ci. Par exemple, la scène peut être vue en tant qu'une forme géométrique complexe du point de vue Classes géométriques de formes, un objet situé à un endroit précis dans l'espace selon le point de vue Configuration spatiale, une structure composée d'autres objets de scènes spécifiées dans Classes de composition, etc. Cette approche multi-vues présente les avantages d'un regroupement local des classes de propriétés pertinentes par rapport à une vision particulière du concepteur, conforme à sa compétence. Les classes des instances des concepts dans un «vue» sont structurées

hiérarchiquement.

Cette démarche propose l'avantage d'un traitement local et distribué, permettant une conception parallèle et coopérative de scènes complexes. Les classes sont hiérarchiques (par relation de spécialisation) et peuvent être «instanciées» aux différents niveaux de la hiérarchie. Cette caractéristique permet la simplification de l'étape de modélisation dans une session de conception, au prix d'une perte de détails (Plemenos 1996b). Un possible but d'inférence peut être la classification de la connaissance, c'est-à-dire la recherche de la classe d'un objet auquel on connaît l'instance.

Le point de vue Méthodes par exemple regroupe les différents méthodes utilisées pour la construction des composants d'un domaine (Figure 4). Ces méthodes constituent des hiérarchies de tâches de résolution comme étant des connaissances méthodologiques.

Connaissances causales probabilistes et CPM. Le modèle CPM (Causal Probabiliste Model) décrit des relations causales existantes entre les unités de connaissances, dénotées par les termes «causes»

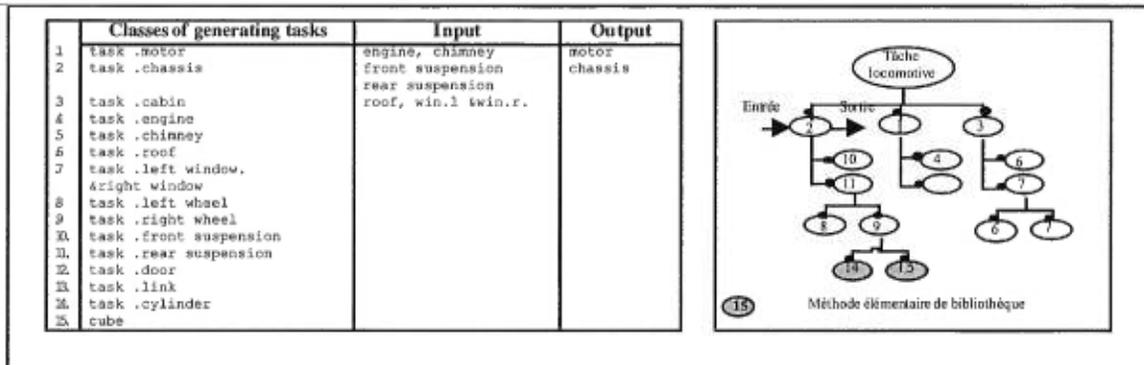


Figure 4. Example of tasks/methods of geometric parametric model generation for the "locomotive" scene.

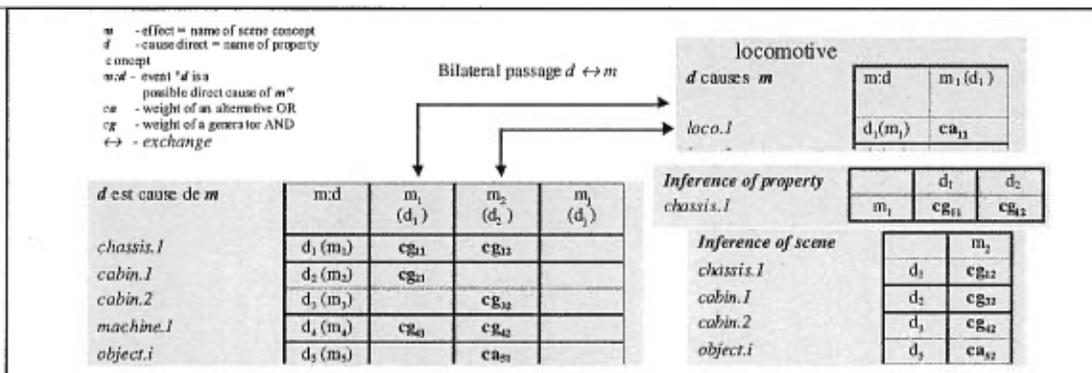


Figure 5. Logical representation of the causal dependencies by means of matrices.

erties, and the effects m_i , instead of representing properties, could represent scenes (Figure 5). The symbols cg_{ij} express the probabilistic weights in the hierarchical causal graph, where edges are joined by means of a logical operator ET. In the case where this connection is expressed by means of the logical "or" operator, we use the symbol ca_{ij} . For the example in Figure 5 each row of the causal dependency matrix allows one to infer a property, and each column of the matrix allows one to infer a scene.

We are also interested in knowing all the causes belonging to the alternative possible coverings which can lead to a given state of the system S_y , and furthermore to propose an arrangement of the coverings, considered as hypothetical solutions, in terms of their level of likelihood. The coverings can be classified as being redundant or non-redundant. The concept of a covering is useful for finding subsets of instances of property attributes

that will lead to solutions in terms of scenes. We are interested in non-redundant coverings satisfying the specified optimization criteria.

We define a non-redundant covering M^* as being the set of causes $d_i \in D$, linked with the manifestations $m_i \in M^*$, and not containing any subsets that are also coverings of M^* . The hypothetical coverings are calculated by exploring the graph of the CPM model. For this one needs the notion of "alternative generators" and the algebraic operation on sets: division, remainder, augmented remainder, that are derived from the classical set operations union, intersection and difference. (Peng 1990). By applying the operations union (joining) and projection to the local CPM graphs, one obtains the global basis for the scene concept. Figures 6-7 show possible inference examples in terms of coverings (Peng 1990) for the causal knowledge base of Figure 5. The two coverings *loco.1*

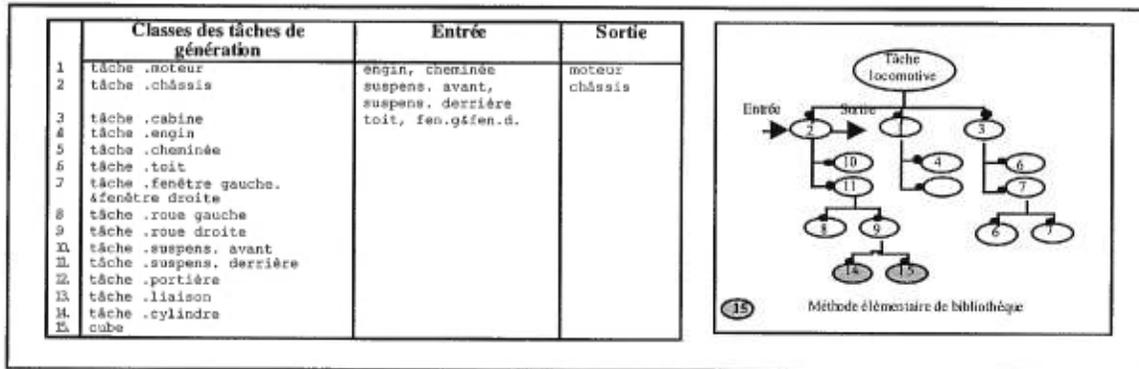


Figure 4. Exemple de tâches/méthodes de génération de modèle géométrique paramétrique de la scène "locomotive."

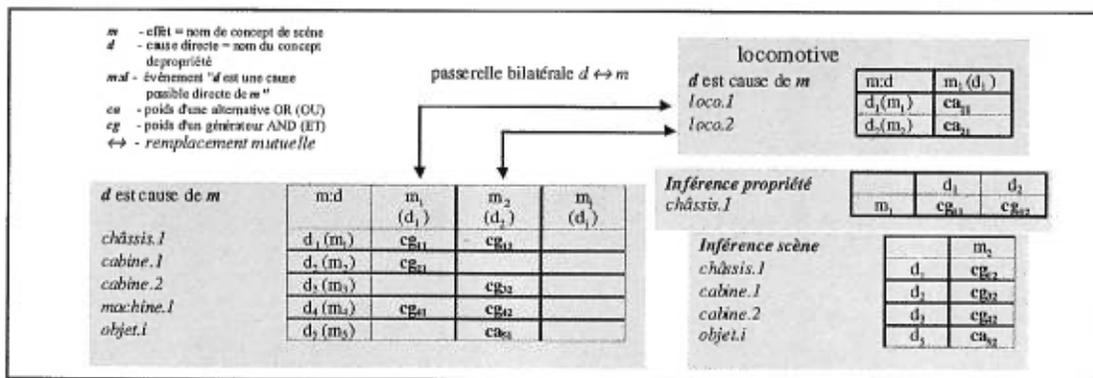


Figure 5. Types of possible inferences from a causal knowledge base. [Représentation logique des dépendances de causalité par matrice.]

propriétés annoncés	propriétés inférés (solutions couvertures)
1 { <i>d</i> ₁ } ⊂ D	{ <i>m</i> ₁ } ∈ M, <i>d</i> ₁ : <i>m</i> ₁ { <i>d</i> ₁ } ∈ { <i>d</i> ₁ : <i>m</i> ₁ | <i>d</i> ₁ }, { <i>d</i> ₁ } ∈ D
2 { <i>m</i> ₁ [*] } ⊂ M	{ <i>d</i> ₁ } ∈ { <i>d</i> ₁ : <i>m</i> ₁ | <i>d</i> ₁ }, { <i>d</i> ₁ } ∈ D
3 { <i>d</i> ₁ }, { <i>m</i> ₁ [*] }, { <i>d</i> ₁ } ⊂ D, { <i>m</i> ₁ [*] } ⊂ M	{ <i>d</i> ₁ } ∈ { <i>d</i> ₁ : <i>m</i> ₁ | <i>d</i> ₁ }, { <i>d</i> ₁ } ∈ D, { <i>m</i> ₁ } ∈ M
4 { <i>m</i> ₁ [*] }, { <i>d</i> ₁ }, { <i>d</i> ₁ } ⊂ D, { <i>m</i> ₁ [*] } ⊂ M	{ <i>d</i> ₁ } ∈ { <i>d</i> ₁ : <i>m</i> ₁ | <i>d</i> ₁ }, { <i>d</i> ₁ } ∈ D, { <i>m</i> ₁ } ∈ M

Figure 6. Types of possible inferences from a causal knowledge base. [Types d'inférences possibles à partir d'une base de connaissances causales.]

propriétés annoncés	propriétés inférés (solutions couvertures)
1 {châssis.1} ⊂ {loco.1, loco.2}	« , » = ET logique {chassis.1, cabine.1, cabine.2, machine.1, objet} {châssis.1 : loco.1, châssis.1 : loco.2} loco.1 = {chassi.1, cabine.1, machine.1} loco.2 = {chassi.1, cabine.2, machine.1}
2 {loco.1} ⊂ {loco.1, loco.2}	{chassi.1, cabine.1, machine.1}
{loco.2} ⊂ {loco.1, loco.2}	{chassi.1, cabine.2, machine.1} OU {objet.i}
3 {châssis.1}, {loco.1}	loco.1 = {chassi.1, cabine.1, machine.1}
4 {loco.2}, {châssis.1}	loco.2 = {chassi.1, cabine.2, machine.1} OU {obej.i}

Figure 7. Examples of inference of covering solutions. [Exemples d'inférence de soluti couvertures.]

and loco.2 offer alternative explanations for the existence of the "locomotive" scene. This proves useful in the situation described in R1 above. If information about the designer's intended scene is limited and insufficient, he can formulate a request for help, by describing his goals (scene concepts, represented by tasks and their methods (Figure 4). The request leads to a prediction of one or more scene concepts and their properties. These lead to the generation of hypothetical solutions (nine sets of instances of classes of attributes in causal relation with the concepts stated as goals).

modeling layer

To this level of the hierarchy, the functionality is defined consistently to the functional model of SOML language. This model is built on the base of functionality concepts kept on this work phase, represented in terms of class in the diagram of the Figure 8.

Functional concepts and geometric internal model. The SOML language permits the creation of geometrical scene models which can be modified in later stages of the design process. The necessary mechanisms for these activities are grouped into the classes Edition, Generation- Integration, Spatial Configuration and Interrogation. These classes contain mechanisms for a) instantiation and integration of the primitive components in order to obtain a final solution (Generation- Integration); b) modification of the solution shapes, the photo-realistic aspect and the context (Edition); c) positioning and reconfiguration of scenes and their components in 3D space (Spatial configuration); d) obtaining answers to the questions about the states of scenes (Interrogation).

According to the conceptual model, presented briefly in the previous paragraphs the prototype of final solution of a scene is a set of instances of the data structure fields of the properties class. This solution is generated from the geometric parametric model of the scene in a process of constraint resolution and qualitative reasoning on the spatial configuration. The geometric parametric model of scene is a list of SOML commands stored in the graphical data base (DoGra) of the environment. The command structure is constituted from lexical elements of the geometrical canonical primitives of

POV format. This presents the advantage of one facilitated coupling of geometrical model instances with the rendering software POV-Ray.

The list of commands contains implicitly the CSG tree of geometrical and appearance primitives, of not instanced variable of their parameters, a set of geometrical transformations and a boolean operations permitting one to make a solution explicit by means of a graphical photo-realistic shape. The code of the model is "compiled" by the interpreter of the environment from the methods of the scenes tasks.

Spatial configuration, qualitative resolution, and positioning scenario. A scene is constituted either of individual components located in 3D space, or of components to be used in a future assembly. In each case one is faced with the problem of spatial configuration, constituting a task of positioning. In a declarative way the user expresses his goal, usually in a qualitative manner, using the syntax and vocabulary of positioning provided by natural language (Donikian 1992). The statement is converted into coordinates in the local reference system of the scene. We now examine how to simulate the problem of declarative control of the 3D objects' spatial configuration.

The method used is based on the formalism of space discretization by means of trees of "octree" form and Allen spatial intervals (Mäntylä 1988; Foley 1995). The target space is considered to be like a box with dimensions width, height and depth, measured with respect to the frame of reference chosen for that specific context. The volume of this space is recursively subdivided into octants, up to the moment where primitive boxes will be completely bounded. The bounding boxes O of positioned objects have the dimensions $O.width$, $O.height$ and $O.depth$, defined with respect to the frame of reference.

generation layer

Once the parametric model of the scene is created, it must be instantiated by the values of the numeric constraints.

The system of coordinates. The system of coordinates (frame of reference of the scene) used is

et «effets» (manifestations). Les connaissances causales sont «plus profondes» que les connaissances heuristiques utilisées par le concepteur pour résoudre un problème.

Le système Sy du à une description possède des états définis par le n -uplet d'attributs binaires $(a_1, \dots, a_p, \dots, a_n)$ (Dubois 1995). Si $a_i = 1$, on accepte qu'il y a des manifestations m_i présentes, et si $a_i = 0$, les manifestations m_i sont absentes. S'il n'y a pas de manifestations présentes, nous disons que le système Sy se trouve dans son état normal (initial) et qu'il peut se décrire par des n -uplets $(0, \dots, 0, \dots, 0)$.

Soit M la dénotation d'un ensemble de n manifestations possibles $\{m_1, \dots, m_p, \dots, m_n\}$. Soit D un ensemble de causes directes des manifestations possibles $\{d_1, \dots, d_p, \dots, d_n\}$. Une cause peut être présente ou absente. Pour chaque d_i est associé un ensemble $effets(d_i)$ de manifestations qui sont une conséquence de la présence des causes d_i . La relation R sur $D \times M$ est définie comme $(d_i, m_j) \in R \iff m_j \in effets(d_i)$ et celle-ci associe des manifestations et des causes.

Pour un système Sy sont possibles différents schèmes d'associations sémantiques, permettant d'obtenir différents types de solutions. Par exemple si l'on s'intéresse de représenter les taxonomies des scènes par rapport aux différentes propriétés qu'elles possèdent, il est convenable d'associer aux manifestations M les concepts de propriétés (encore attributs de propriétés) et aux causes D les concepts de scènes possédant ces propriétés. Tous ceci exprime le fait d'en avoir une classe de propriétés due à l'existence des scènes, caractérisés par ces propriétés.

Etant donnée un ensemble M^+ de propriétés présentes (décrites ou demandées par une requête), le problème de résolution résulte d'en trouver la (es) scène(s) qu'elle puisse(ent) posséder les propriétés de l'ensemble M^+ . Nous supposons que l'ensemble $M^- = M - M^+ = \neg(M^+)$ est l'ensemble de propriétés absentes, c'est-à-dire toutes les manifestations présentes sont observables. Le mode de raisonnement abductif que nous utilisons permet la recherche de causes (par ex. scènes) possibles justifiant (ou expliquant) les effets (par ex. les

propriétés) observées. Autrement dit, nous cherchons des explications en termes de solutions de scènes existantes possibles pour un ensemble des propriétés demandés pendant une conception.

Pour chaque «vue» des scènes, on crée une base locale, représentée par un graphe bipartite possédant deux types de noeuds: les noeuds d_i des causes directes de l'effet m_i , et les noeuds des effets m_i (Figure 3, Figure 5). Aux liens entre ces deux types de noeuds sont associés des poids probabilistes c_{ij} (force de causalité) reflétant les connaissances du domaine en termes des valeurs numériques normalisées dans l'intervalle $[0, 1]$. Par exemple elles peuvent être les fréquences d'occurrences de chaque concept cognitif de propriété de scène dans un événement «scène présente». La base est complétée aussi par des probabilités *a priori* de l'existence des causes d_i dans un domaine.

Les connaissances probabilistes du domaine servent à calculer un critère, appelé «mesure de vraisemblance» permettant l'évaluation de la crédibilité des différentes hypothèses de solutions potentielles en termes de couvertures. Comme il a été déjà noté plus haut il est possible d'en avoir d'autre type d'associations sémantiques sur les deux types des noeuds de la Figure 3. Les noeuds d_i des causes directes au lieu de représenter des scènes, ils peuvent représenter des propriétés, et des effets m_i au lieu de représenter des propriétés, ils peuvent représenter des scènes (voir la Figure 5). Les symboles cg_{ij} expriment les poids probabilistes dans le graphe causal hiérarchique, où les branches sont liées avec un opérateur ET logique. Dans le cas où cette liaison est exprimée par l'opération OU logique nous utilisons le symbole ca_{ij} . Pour l'exemple de la Figure 5, chaque ligne de la matrice de dépendances causales permet d'inférer une propriété et chaque colonne de la même matrice permet d'en inférer une scène.

Nous nous intéressons aussi de connaître toutes les causes appartenant aux couvertures concourantes (alternatives) possibles qui peuvent conduire vers un état donné du système Sy , et en plus de proposer un rangement des couvertures, considérées comme des hypothèses des solutions possibles selon leur niveau de vraisemblance. Les

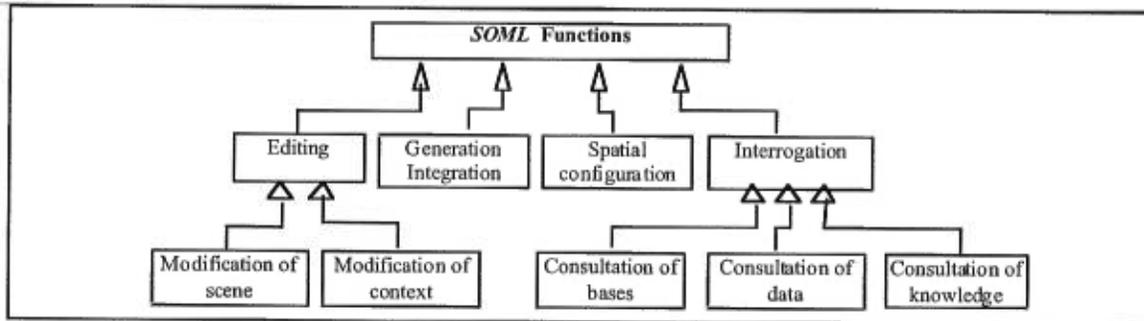


Figure 8. Diagram of functional classes for SOML.

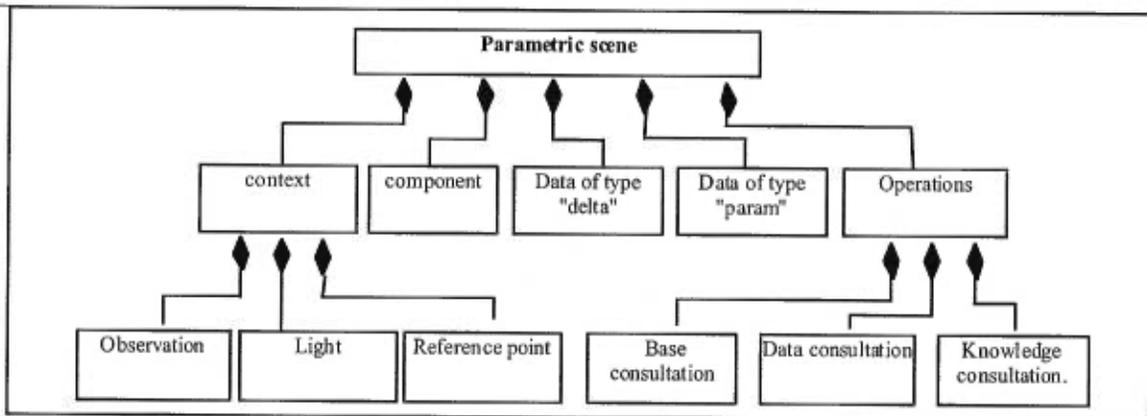


Figure 9. Class diagram for the internal parametric model.

of type "left-handed": the X axis is oriented to the right of the screen before the observer, the axis Y is oriented upward and the Z axis is oriented away from the observer. The dimensions on the three axes are expressed by some real number or by the percentage with regard to the 3D of the bounding volume where there exists the equivalence right \leftrightarrow "+ X," left \leftrightarrow "-X," high \leftrightarrow "+ Y," low \leftrightarrow "-Y," before \leftrightarrow "Z" and behind \leftrightarrow "+ Z." The localization in the reference point $O(X, Y, Z) \leftrightarrow O(\text{right, high, behind})$ is specified by vectors of real of one or three arguments. For the position, the orientation, the dimensions and their modifications one uses geometric parametric transformations, in our case according to expression 3-1, 3-2, 3-3 (Foley 1995).

Parametric model of the primitives. The generic parametric primitives are represented by some characteristic points according to the visualization

format of POV. An example of such (canonical) primitives is the sphere algebraic class represented by the points $\{<\text{CENTER}>, \text{RADIUS}\}$.

In the following paragraph we present the basic theoretical concepts and the principal techniques used for the definition and the experimentation of the data storage definition model, explored by SOML during a design session

Data Model. In terms of data a concrete solution consists in a list of instances of the parameters of the geometric primitives of the model, satisfying the imposed constraints. These data have a particular format visible by means of the rendering software POV and they reside in the graphical data base. The data of one scene solution are defined in the object-oriented conceptualization formalism according to the diagram presented in the Figure 11. This model defines the concepts and the classes

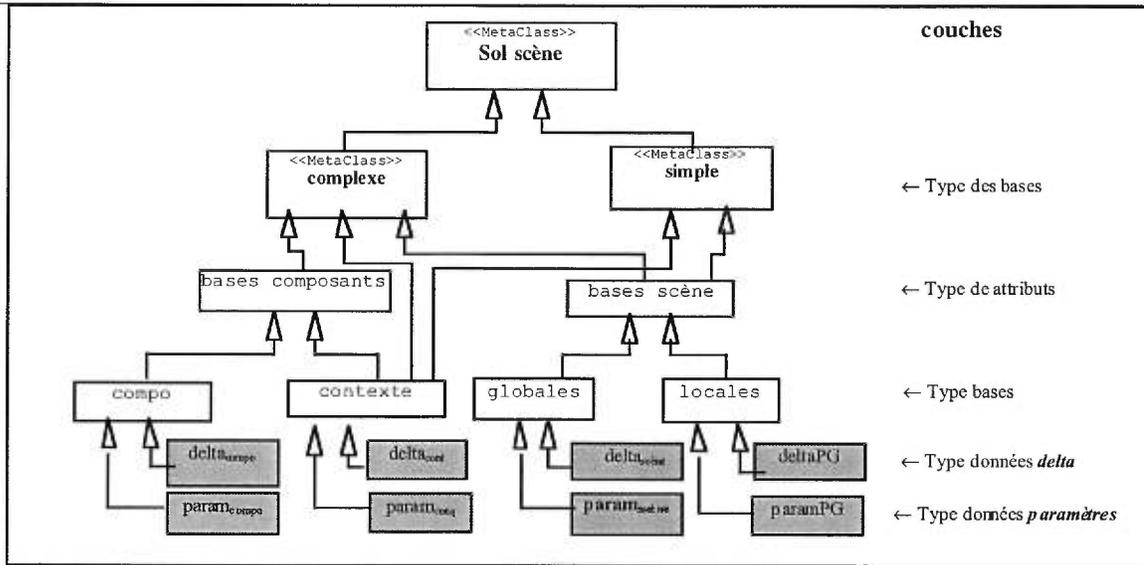


Figure 11. Conceptual diagram of the data storage model of a scene. [Schéma conceptuel du modèle de données de stockage d'une scène.]

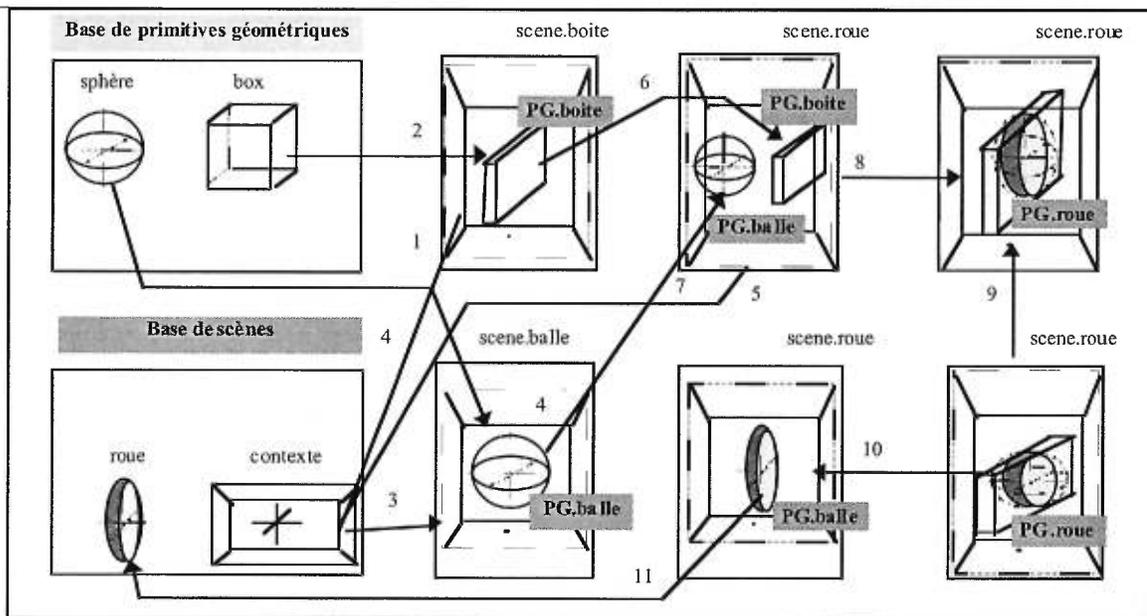


Figure 12. Sample scenario of actions involved in generating the "wheel" scene. [Exemple de scénario d'actions de génération de la scène "roue".]

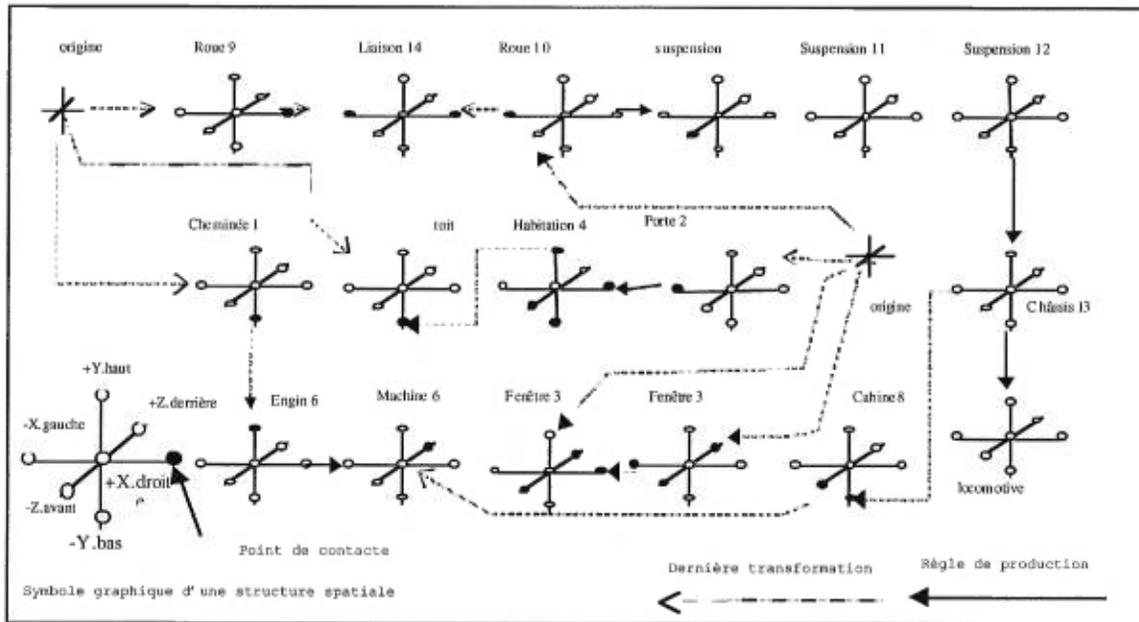


Figure 1.3. Graph of the production scenario of the spatial structure of the "locomotive" scene. [Graphe du scénario de production de la structure spatiale de la scène "locomotive."]

<p>Steps</p> <p>after executing the instructions:</p> <pre>generate_simple(ball) \ place(scene_ball, ball, wheel, small_ball)</pre>	<p>Steps</p> <p>after executing the instructions:</p> <pre>generate_simple(ball) \ place(scene_ball, ball, wheel, small_ball) generate_simple(box) place(scene_box, box, wheel, flat_box)</pre>
<p>compilation of parametric model:</p> <pre>#include "delta_wheel.inc" #include "param_wheel.inc" #include "delta_context_wheel.inc" #include "param_context_wheel.inc" #include "context_wheel.inc" #include "small_ball.inc" object { small_ball }</pre>	<p>compilation of parametric model:</p> <pre>#include "delta_wheel.inc" #include "param_wheel.inc" #include "delta_context_wheel.inc" #include "param_context_wheel.inc" #include "context_wheel.inc" #include "small_ball.inc" object { small_ball } #include "flat_box.inc" object { flat_box }</pre>
	<p>after executing the instructions:</p> <pre>generate_simple(ball) \ place(scene_ball, ball, wheel, small_ball) generate_simple(box) \ place(scene_box, box, wheel, flat_box) \ generate_complex(small_ball, flat_box, intersection)</pre>
	<p>compilation of parametric model:</p> <pre>#include "base_wheel.inc" #include "context_wheel.inc" #include "small_ball.inc" #include "flat_box.inc" #declare PG1wheel = intersection (object { small_ball } object { flat_stone }) #declare wheel = object { PG1wheel scale < XsPG1wheel, YsPG1wheel, ZsPG1wheel > rotate < XrPG1wheel, YrPG1wheel, ZrPG1wheel > translate < XtPG1wheel, YtPG1wheel, ZtPG1wheel > } object { wheel transform TrS_wheel }</pre>

Figure 14. Steps in creating the geometric parametric model of the "wheel" scene. [Les étapes de création du modèle géométrique paramétrique de la scène "roue".]

of objects necessary for the generation of one concrete solution.

A scene is considered to be of "complex" type if it must manage the data for its constituent components; otherwise it is of type "simple" and contains only a single geometric structure. The method of "simple" scene generation doesn't use boolean operations in the final stage of the design. A scene of "complex" type, on the other hand, is obtained by means of methods containing instructions with regular boolean operations.

In the example of the Figure 14, the scene obtained by the method containing the last instruction "generate.simple" (ball, sphere,...) is of type "simple". In the same example the scene "wheel" is of type "complex". The two types of scenes refer to the two classes of objects representing the basic concepts in the data bases: "scenes database" and "components database". The class "scenes database" specializes to "global database" and "local database."

language structure

The language is structured on the basis of a multiple layer hierarchy of different functionality classes supported by the context of the design-assistance environment. Every class belongs to a model and to a particular view of the scene defined by the conceptual model (Figure 1). The classes of one layer contain methods constituting the type of the sub-language corresponding to the linguistic schemes at this level. One distinguishes three levels of functionality represented by the layers: *knowledge* (acquisition, representation), *modeling* (geometric, photometric), and *generation* (constraint resolution, instantiation). To every layer corresponds a sub-language: macro-instructions of description of the methodical and causal probabilistic knowledge; instructions for geometric and photometric modeling; and commands, for instantiation of primitives and of operations (geometric transformations, boolean operations). Such an approach appears to be consistent with the declarative methodology's characteristic feature of allowing a certain inaccuracy and incompleteness in the scene description. By subdividing the means of description into classes one insures the possibility of conceptualizing the scenes from partial de-

scriptions of properties belonging to the known views.

macro-instructions and tasks

The role of the macro-instructions of the upper layer is to provide a way of modeling the tasks of the design process as being methodological knowledge. We distinguish macro-instructions: (a) making possible, according to the concepts defined in the MCR model, a description of the tasks, made up of incremental methods of construction of scene solutions; and (b) serving to describe the properties and their causal dependencies according to the CPM model. The notion of a task permits a compact and structured representation of a scene design problem and information about its solution in terms of methods and scenarios of assembly/disassembly. This strategy is represented by a graph of specialization and decomposition into sub-problems of reduced complexity. In the lowest layer the decomposition of the problem becomes a single task, and its solution strategy consists in calling one method from the domain knowledge base.

The simplified syntax is as follows:

```

task      ::= macro {name_task} {knowledge}{status}
macro     ::= {vocabulary}{args}
vocabulary ::= generate | modify | ...
knowledge ::= descending | task | cause | effect | relation | inference
name_task ::= {alpha}
alpha     ::= letter-10I...19.
letter    ::= a|b|...|z|A|...|Z
status    ::= complex | final | entry | exit

```

The strategy for executing the tasks is a causal chaining between the levels in the hierarchy. The inference engine explores the space of the sub tasks based on the causality knowledge, valued to different levels of detail. The role of the reasoning is to identify the sequence of tasks to execute starting from data entry in a general and incomplete case. The set macro-instructions of causal links descriptions is intended to give causal probabilistic knowledge containing the identifiers of the nodes of the causes and the effects and the values of the causality strengths between those nodes.

instructions layer, taxonomy of methods

The execution of the methods of the tasks of

couvertures peuvent être classifiées comme des redondantes ou irredondantes. Le concept de couverture sert à trouver des sous-ensembles d'instances d'attributs de propriétés qui vont évoquer des instances de solutions en terme de scènes. Nous nous intéressons de couvertures irredondantes satisfaisant les critères d'optimisation choisis.

Définition : Une couverture irredondante de M^+ est l'ensemble de causes $d_i \in D$, liées avec les manifestations $m_i \in M^+$, mais qui ne contient pas des sous ensembles étant aussi des couvertures de M^+ .

Les couvertures - hypothèses sont calculées par exploration du graphe du modèle CPM. Pour ceci sont utilisées les notions de générateurs d'alternatives et des opérations algébriques ensemblistes reste, division et reste augmenté dérivés des opérations classiques union, intersection et différence (pour des détails voir Peng 1990). En appliquant des opérations de jointure et de projection sur les graphes CPM locaux s'obtient la base de connaissances globale du concept de la scène. Les Figure 6-7 montrent des exemples d'inférence possibles en termes de couvertures, introduit par (Peng 1990) pour la base de connaissances causales de la Figure 5. Les deux couvertures loco.1 et loco.2 sont en compétition pour expliquer l'existence de la scène "locomotive." Ceci s'avère utile dans le cas formulé antérieurement par la règle R1. Si les informations connues sur la scène visée par le concepteur sont réduites et insuffisantes, il peut formuler une requête d'assistance, exprimée par une description des buts (concepts de scènes, représentés par tâches et ses méthodes (Figure 4). La requête provoque la prédiction d'un ou plusieurs concepts de scènes et des propriétés, existantes. Ces derniers déclenchent la génération d'hypothèses de solutions (ensembles d'instances des classes d'attributs étant en relations de causalité avec les concepts énoncés comme des buts).

Couche modélisation

A ce niveau de la hiérarchie, les fonctionnalités sont définies conformément au modèle fonctionnel du langage SOML. Ce modèle est construit à base de concepts de fonctionnalité retenus à ce stade

du travail, représentés en termes de classes dans la diagramme de la Figure 8.

Concepts fonctionnels et modèle géométrique paramétrique interne. Le langage SOML permet la création de modèles cognitifs et géométriques de scènes, spécifiés dans les différentes «vues» qui peuvent être postérieurement modifiées dans les étapes successives de l'évolution de la conception. Les mécanismes nécessaires pour l'exécution de ces activités sont regroupés dans les classes Edition, Génération-Intégration, Configuration spatiale et Interrogation. Ces classes regroupent des mécanismes pour (a) l'instanciation et l'intégration des primitives des composantes afin d'obtenir une solution finale (Génération-Intégration); (b) la modification des solutions de formes, l'aspect photo et le contexte(Edition); (c) l'effectuer le positionnement et la reconfiguration des scènes et ses composants dans l'espace 3D (Configuration spatiale); (d) l'obtention de réponses aux questions concernant les états de scènes (Interrogation).

Selon le modèle conceptuel, présenté brièvement dans les paragraphes précédents, le prototype de solution-finale d'une scène est un ensemble d'instances des champs de la structure de données des classes des ses propriétés. Cette solution est générée à partir du modèle géométrique paramétrique de la scène dans un processus de résolution des contraintes et de raisonnement qualitatif sur la configuration spatiale.

Le modèle géométrique paramétrique d'une scène (Figure 9) est une liste de commandes SOML stockées dans la base de données graphiques (DoGra) de l'environnement. La structure des commandes est constituée des éléments lexicaux des primitives géométriques canoniques du format POV. Ceci présente l'avantage d'un couplage facilité des instances du modèle géométrique avec le logiciel du rendu d'images réalistes *POV-ray*.

La liste de commandes contient implicitement l'arbre CSG, constitué de primitives géométriques et d'apparence, de variables non instanciées de leurs paramètres, d'un ensemble de transformations géométriques et d'opérations booléennes permettant d'explicitier une solution sous forme d'image photo réaliste. Le code du modèle est

the macro-instructions layer decomposes into chains of instructions associated to the different activities necessary to construct the geometric parametric model of the designed scene. The instructions are interpreted by the ISOML interpreter belonging to the environment. The principal types of instructions make up the sub-languages: Generation and Integration of Scenes, Configuration of Scenes, Editing (modification of scenes, modification of context: initial bounding scene), and Interrogation (accessing the graphical and knowledge data bases).

Generation and Integration of Scenes. The instructions of generation and integration of the primitive are the tools for constructing scenes from canonical geometric and photometric primitives, by means of CSG construction operations and constraint resolution. Reserved words are as follows:

Generation and integration of scenes:
generate_simple, generate_complex,
generate_context, generate_box.

Scene editing: place, displace, erase, constraint, reposition.

Modification of scenes: modifie taille, modifie orientation, initialise.

Modification of context: modify observation, modify light, modify texture.

Information gathering: create scene, attach geometry, attach base of primitives, attach information, attach Spatial configuration, render image, visualize scene.

command statements

The level of the commands depends on the type of geometric modeler used and specifies the format of the primitives expected by this modeler. The software validating this stage of the approach, SOML is based on a solids modeler that supports standardized expanded CSG operations, constructed from public domain utilities available through the Internet. The primitive commands keywords and syntax of commands is:

primitive commands - reserved keywords:
sphere, box, cylinder, cone, plane, etc.
scene := language_directives camera
{camera_items} object_statements
atmosphere_statements

global_statements{global_items}

command ::= [#declare] [name alpha] [=object]
{[PGI] name alpha {operation}}

operation ::= transform "<< vector >>"

vector ::= {axis index [PGI name]}

axis ::= X | Y | Z

index ::= s | r | t

transform ::= scale | rotate | translate {object [] name transform TrS_{name}}

execution scenarios

The design scripts determine the possible sequence of tasks, predicted in the conceptual model of the scene. An example of such a script is shown in the Figure 12. The labels above the arrows reflect the order of execution of the different stages. In order to facilitate the representation of the scenario of one spatial configuration, we propose the diagrammatic formalism based on the use of graphic symbols, shown in Figure 13. The advantage of this approach consists in the possibility of creating a language and a grammar of structures for the production of other spatial configurations. It is possible to have more than one scenario for the construction of the target scene. These are all part of the methodological knowledge explained above. A scenario is made up of a sequence of targeted methods of executing the tasks of the scene. It can be compiled either automatically from the global model of scene knowledge, or assembled and modified with the SOML tools of the Instructions layer.

experimental results

To illustrate the above-mentioned ideas, in the Figures 15-18, we present one example of the design of the scene of the wooden toy "train." The descriptions of the known properties (Figure 15) will be converted into a set of SOML instructions (Figure 16), constituting the methods of construction (Figure 17).

conclusion

The creation of software to assist with scenes design is a difficult task due to the complexity of the underlying problems. Indeed the requirements of functionality necessitate a computer system regrouping several objects and methods of treatment. The potential advantages resulting from the use of

«compilé» par l'interpréteur de l'environnement à partir des méthodes des tâches de la scène.

Configuration spatiale, résolution qualitative et scénario de positionnement. Une scène est constituée soit de composants individuels localisés dans l'espace 3D, soit de composants d'un assemblage futur. Dans les deux cas on se heurte avec le problème de configuration spatiale, constituant une tâche de positionnement. Dans un cadre déclaratif l'utilisateur exprime son but surtout qualitativement par un vocabulaire appartenant aux syntagmes locatifs du langage naturel (Donikian 1992). L'énoncé est converti sous forme de coordonnées dans le repère local de la scène. Le sujet concerne la simulation du problème du contrôle déclaratif de l'aménagement spatial d'objets 3D.

La méthode qualitative quantitative utilisée est basée sur le formalisme de discrétisation de l'espace par intervalles spatiaux d'Allen sous forme d'arbre octree (Allen 1983; Mäntylä 1988; Foley 1995). L'espace cible est considéré comme étant une boîte avec des dimensions largeur, hauteur et profondeur définies par rapport au repère du contexte choisi. Le volume de cet espace est partitionné récursivement en octants jusqu'au moment où les boîtes des primitives à positionner pourront être englobées complètement. Les boîtes englobantes des objets à positionner O ont des dimensions O .largeur, O .hauteur et O .profondeur définies par rapport du centre du repère.

Couche génération

Une fois créé, le modèle paramétrique de la scène doit être «instancié» par les valeurs des données des contraintes numériques.

Le système de coordonnées. Le système de coordonnées (repère de la scène) utilisé est de type «main gauche»: l'axe X est orientée vers la droite de l'écran devant l'observateur, l'axe Y est orienté vers le haut et l'axe Z est orienté dans le sens opposé de l'observateur. Les mesures sur les trois axes sont exprimées par des réels ou par le pourcentage par rapport aux 3 dimensions du volume englobant où il existe l'équivalence droite \leftrightarrow « $+X$ », gauche \leftrightarrow « $-X$ », haut \leftrightarrow « $+Y$ », bas \leftrightarrow « $-Y$ », avant \leftrightarrow « $-Z$ » et arrière \leftrightarrow « $+Z$ ».

Les allocations dans le repère $O(X,Y,Z) \leftrightarrow O(\text{droite, haut, arrière})$ sont spécifiées par des vecteurs de réels de 1 ou 3 arguments. Pour la position, l'orientation, les dimensions et leurs modifications on utilise des transformations géométriques, paramétrées dans notre cas selon expression 3-1, 3-2, 3-3 (Foley 1995).

Modèle paramétrique des primitives. Les primitives génériques paramétriques, sont représentés par des points caractéristiques selon le format de visualisation POV. Un exemple de telle primitive canonique est la classe algébrique *sphère* représentée par les points caractéristiques { <CENTER > , RADIUS }.

Dans le paragraphe suivant nous présentons les concepts théoriques de base et les techniques principales utilisées pour la définition et l'expérimentation du modèle de définition des données de stockage, explorés par SOML au cours d'une session de conception

Modèle des données. En termes de données une solution concrète se traduit dans l'obtention d'une liste d'instances de paramètres des primitives du modèle géométrique satisfaisant les contraintes imposées. Ces données possèdent un format particulier visible par le logiciel de rendu Pov est elles résident dans la base de données graphiques. Les données d'une solution de scène sont définies dans le *formalisme conception objet orienté* selon le schéma conceptuel présenté dans la Figure 11. Ce modèle définit les concepts et les classes d'objets nécessaires pour la génération d'une solution concrète.

Une scène est considérée comme un type «complexe» si elle doit gérer les données des composants qu'elle englobe par contenance sinon elle est du type «simple» et elle ne contient qu'une seule structure géométrique. Les méthodes de génération de scènes «simples» n'utilisent pas d'opérations booléennes à l'étape finale de la conception. La scène de type «complexe» au contraire, s'obtient par l'intermédiaire des méthodes contenant des instructions ayant des opérations booléennes régulières.

Dans l'exemple de la Figure 4-5, la scène

Viewpoint	"Natural" Description	Deduced Relations
n of #1 "size"	The scene train is made up of 5 components The components locomotive are loco.1, loco.2, loco.3 The components wagon are wagon.1, wagon.2	(components, 5) (compo.1, loco.1) (compo.5, wagon.2)
n of #2 "Generate"	Component loco.1 is on the left. Component loco.2 is in the middle. Component loco.3 is on the right Component wagon.1 is to the right of component loco.1 Component wagon.2 is to the left of component loco.3	(loco.1, on_left) (loco.2, in_middle) (loco.3, on_right) (wagon.1, on_right, loco.1) (wagon.2, on_left, loco.3)
apoints ...		.....

Figure 15. Part of the declarative description of the "train" scene.

1	2	3	4	5	6
loco loco.1 1	move \ train loco.1) higher 0 \ distance \ 7 units 0	place \ scene_loco loco.1) train loco.2) position \ to_right_of distance \ 10 units 0	change_size \ train loco.2) smaller 0 \ distance 0.5 units 0	move \ train loco.2) more_to_right \ distance 7 units \ higher 0 \ distance 7 units 0	place \ scene_loco loco.1) train loco.3) position \ to_left_of distance \ 20 units 0
7	8	9	10	11	12
size/train-smaller #0.5	move \ train loco.2) move_to_right 0 \ distance \ 7 units \ higher 0 \ distance \	role \ train loco.2) horizontal_to_left 0 \ angle \ 60 units \	role \ train loco.3) horizontal_to_left 0 \ angle \ 30 units \	generate_complex train 0 \ union 0 0 \ 2 units \ white_wood 0 0 3 \ loco1 loco2 loco3	modify_observation \ train o_loco \ more_to_front 0 \ distance 50 \ plus_a_right 0 \ distance \ 100 units 0

Figure 16. Instructions for the construction method for the class "wooden trains:" generate.train.

#	macro-instruction (method)	(scene)	(scene)	(scene)	ext.3 (scene)	Comments
	generate.wheel	ball	box	-	wheel	generation of wheel
	generate.hub	ball.2	box.2	-	hub	generation of wheel.2
	generate.link	side.left	side.right	rod	link	generation of link
	generate.suspension	wheel	wheel	link	suspension	generation of suspension
	generate.chassis	suspension	suspension	-	chassis	generation of chassis
	generate.chassis.2	suspension.2	suspension.2	-	chassis.2	generation of chassis.2
	generate.roof	box	ball	-	roof	generation of roof
	generate.caboose	box	window.g	window.d	caboose	generation of caboose
	generate.caboose.2	box	window.g	window.d	caboose.2	generation of caboose.2
	generate.cabin	caboose	roof	-	cabin	generation of cabin
	generate.cabin.2	caboose.2	roof	-	cabin.2	generation of cabin.2
	generate.chimney	hyperboloid	side.1	side.2	chimney	generation of chimney
	generate.engine	side.1	cylinder	side.2	engine	generation of engine
	generate.machine	engine	chimney	-	machine	generation of machine
	generate.loco	machine	cabin	chassis	loco	generation of locomotive
	generate.wagon	cabin.2	chassis.2	-	wagon	generation of wagon
	generate.train	loco.1	wago.1	wago.2	train	generation of train

Figure 17. Incremental method of hierarchical generation of the "train" scene.

the language consists in its functionality enabling it to be of assistance during all stages of the design process of complex scenes. Beyond these initial encouraging results, there remains to improve the degree of application of these cognitive techniques of representation and knowledge exploitation; to integrate Bayesian learning; to perfect the terminology (i.e. to create a base of terminological knowledge, BCT, that will facilitate the use of the SOML language for different types of applications); to develop a linguistic scheme; and to create a convivial work environment.

To this end, as already emphasized, the SOML language makes possible the creation of models of scenes, including such features as geometry, topological configurations, realistic aspects, methods of construction, etc., that can be modified during subsequent stages of the design process. Indeed, a designer's most important task is to make precise the often vague and ambiguous objectives stated by the client or by specialists from other fields, to fulfill these objectives, and thereby identify the fundamental purpose of the system (Rivero 1977).

By analyzing how a designer works, we can envisage an application of the SOML language as design-assistance tool in Architecture. Indeed, early in the design process, when communicating with a client, an architect might use a sketch, which is a link between the design concept and the real world. By analogy with this evolving sketch, we can say that a language which takes into account the descriptive declaration of the initial concept, and the possibility of reasoning in a qualitative and quantitative manner about the properties of the model, is related to the architectural design process. We see in this language a tool based not only on the production of synthetic and realistic images of 3D scenes (i.e. drawings), but also on their development. In this process, the form is not the result of an analysis of solutions, nor of a simple list of functions, but rather the result of cybernetic activity. The functions (activities) can be considered as a process of verification of the architectural idea; the mental pre-conceptualization of a problem throughout the evolving representation of the form (Portoghesi 1981).

The use of computers in design leads to re-

obtenue par la méthode contenant comme dernière instruction `genere.simple(balle, sphere, ...)` est du type «simple». Sur la même Figure la scène «roue» est du type «complexe». Les deux types de scènes se réfèrent aux deux classes d'objets représentant les concepts de base des données de stockage: «bases scènes» et «bases composants». La classe «bases scène» est spécialisée en «bases globales» et «bases locales».

Structure

La structure du langage est définie à la base de l'architecture constituée de la hiérarchie de classes correspondantes aux différentes fonctionnalités supportées dans le contexte de l'environnement d'aide à la conception. Chaque classe appartient à une couche et à une vue particulière sur la scène définie par le modèle conceptuel (Figure 1). Les classes d'une couche possèdent de méthodes constituant le type du sous-langage correspondant au schémas linguistiques associés à ce niveau.

On distingue 3 niveaux de fonctionnalités représentés par les couches Connaissances (acquisition et représentation), Modélisation (géométrique photométrique) et Génération (résolution de contraintes et instantiation). A chaque couche correspond un sous-langage: Macroinstructions de description des connaissances méthodologiques et causal probabilistes, Instructions de modélisation géométrique et photométrique, Commandes d'instantiation de primitives et d'opérations (transformations géométriques et opérations booléennes).

Une telle approche nous semble très cohérente avec la caractéristique de la méthodologie déclarative de permettre une certaine inexactitude et incomplétude de la description. En partageant les moyens de description par classes nous assurons la possibilité de concevoir des scènes à partir de description partielle des propriétés appartenant aux vues connues.

Niveau de macroinstructions et tâches

Le rôle des *macroinstructions* du niveau supérieur est de fournir un moyen pour la modélisation des tâches de la conception comme étant des connaissances méthodologiques. On

Type de Vue	Description "naturelle"	Relations déduites
Description de point de vue N° 1 "Composition"	La scène "train" est composée de 5 composants Les composants "locomotive" sont "loco.1", "loco.2", "loco.3" Les composants "wagon" sont wagon.1, wagon.2	(composants, 5) (compo.1, loco.1) (compo.5, wagon.2)
Description de point de vue N° 2 "Configuration spatiale"	Le composant "loco.1" est à gauche. Le composant "loco.2" est au milieu. Le composant "loco.3" est à droite Le composant "wagon.1" est à droite du composant "loco.1" Le composant "wagon.2" est à gauche du composant "loco.3"	(loco.1, à_gauche) (loco.2, au_milieu) (loco.3, à_droite) (wagon.1, à_droite, loco.1) (wagon.2, à_gauche, loco.3)
d'autres "vues"		.....

Figure 15. Une partie de la description déclarative de la scène "train."

1	2	3	4	5	6
place\ scene_loco loco\ train loco.1 position_spatiale\ au_dessus_de\ distance\ 6 inites 0	deplace \ train loco.1\ plus_haut 0 \ distance\ 7 unites 0	place\ scene_loco loco\ train loco.2\ position_spatiale\ au_droite_de\ distance\ 10 inites 0	change_taille\ train loco.2\ plus_petite 0\ distance 0.5 unites 0	deplace \ train loco.2\ plus_a_droite \ distance 7 unites\ plus_haut 0\ 7 unites 0	place\ scene_loco loco\ train loco.3\ position_spatiale\ a_gauche_de\ distance\ 20 inites 0
7	8	9	10	11	12
change_taille\ train loco.3\ plus_petite 0\ distance\ 0.5 unites 0	deplace \ train loco.2\ plus_a_droite 0\ distance\ 7 unites\ plus_haut 0\ distance\ 7 unites 0	rote \ train loco.2\ horizontale_ a_gauche 0\ angle\ 60 unites\ 60 unites 0	rote \ train loco.3\ horizontal_ to_left 0\ angle\ 30 unites\ 30 unites 0	genere_complex train 0\ union 0 0\ 2 unites\ bois_blancl 0 0 3\ loco1 loco2 loco3	modifie_observation\ train_c_locl plus_avant 0\ distance60\ plus_a_droite 0\ distance\ 100 unites 0

Figure 16. Le jeu d'instructions de la méthode de construction d'une classe de trains de bois "generer.train."

#	A	macro-instruction (method)	entrée.1 (scène)	entrée.2 (scène)	entrée.3 (scène)	sortie.3 (scène)	Commentaire
1.		generate.roue	balle	boite	-	roue	generation de wheel
2.		generate.hublot	balle.2	boite.2		hublot	generation de roue2
3.		generate.liaison	parois.gauch	parois.droite	axe	liaison	generation of liaison
4.		generate.suspensi	roue	roue	liaison	suspension	generation de suspension
5.		generate.chassis	suspension	suspension	+	chassis	generation de chassis
6.		generate.chassis.2	suspension.2	suspension.2	+	chassis.2	generation de chassis.2
7.		generate.toit	boite	bale	+	toit	generation de toit
8.		generate.habitat	boite	fenetre.g	fenetre.d	habitation	generation de habitation
9.		generate.habitat.2	boite	fenetre.g	fenetre.d	habitation.2	generation de habitation.2
10.		generate.cabine	habitation	toit	-	cabine	generation de cabine
11.		generate.cabine.2	habitation.2	toit	-	cabine.2	generation de cabine.2
12.		generate.cheminee	hyperboloide	parois.1	parois.2	cheminee	generation de cheminee
13.		generate.engin	paroi.1	cylindre	parois.2	engin	generation de engin
14.		generate.machin	engine	cheminé	-	machine	generation de machine
15.		generate.loco	machine	cabln	chassis	loco	generation de locomotive
16.		generate.wagon	cabine.2	chassis.2		wagon	generation de wagon
17.		generate.train	loco.1	vago.1	vago.2	tren	generatin de train

Figure 17. Méthode incrémentale de générati hiérarchique de la scène "train".

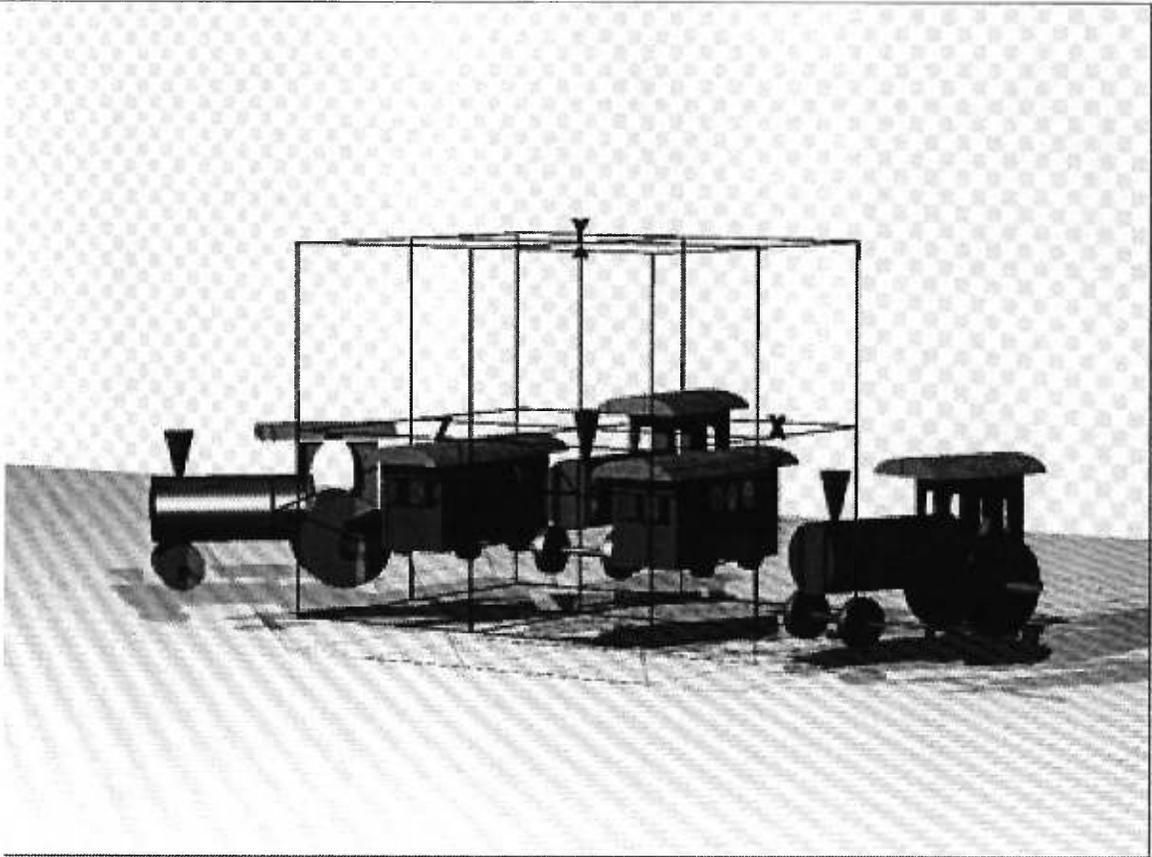


Figure 18. Image of the final "train" scene resulting from a design scenario. [Image de la scène final "train" obtenue par une séquence d'activités exécutés selon un scénario de conception.]

search on systems that manipulate not only the components of a scene, but also the design process itself. These systems simplify the stages of analysis, synthesis, and design evaluation, right from the beginning of the design phase. A distinctive feature of this research is the form of reasoning used; based on inferences (deductions, abductions, or CSP) and the use of a symbolic approach instead of numeric calculations. This makes the design process more explicit and transparent. Other research in this direction, notably that of GRCAO and GEODE (research groups in computer-aided design), proposes using modeling methods based on the declarative description of the construction process and its translation into computer input, making possible a complete parameterization of the model (SGDlsoft 1995). In this way we can produce simulations and an interaction between the vision of the architect and the shape of the object. This re-

distingue des macroinstructions permettant selon (a) les concepts définis dans le modèle MCR, la description des tâches qui sont constituées des méthodes de construction incrementale des composants des scènes; (b) le modèle CPM, la description des propriétés et leurs dépendances de causalité.

Une tâche permet une représentation compacte et structurée d'un problème de conception des scènes et les connaissances de sa résolution en termes de méthodes et scénarios d'assemblage/désassemblage. Elle spécifie les données d'entrée, le résultat et la stratégie de la résolution. Cette stratégie est représentée sous forme d'un graphe de spécialisation et décomposition en sous problèmes de complexité réduite. Au niveau le plus bas la décomposition du problème devient une seule tâche, et sa stratégie de résolution consiste dans l'appel d'une méthode de la base des méthodes du domaine.

Le syntaxe simplifié est donné ci-dessous :

```
tache ::= macro [nom_tache]{connaissance}[statut]
macro ::= {vocabulaire[argo] }
vocabulaire ::= génère | modifie | ...
connaissance ::= descendante | tache | cause | effet | relation
| inférer
nom_tache ::= [alpha]
alpha ::= letter-|0|...|9.
letter ::= a|b|...|z|A|...|Z
statut ::= complexe | final | entrée | sortie
```

La stratégie de résolution des tâches est un chaînage causal entre les niveaux de la hiérarchie. Le moteur d'inférence explore l'espace des sous-tâches à base des connaissances de causalité, estimées à différents niveaux de détail entre les objets des différentes vues. Le rôle du raisonnement est d'identifier la séquence de tâches à exécuter à partir des donnée d'entrée dans un cas général et incomplet.

Le jeux des macroinstructions de descriptions de liens de causalité est destinées à construire une base de connaissances causales-probabilistes contenant les identificateurs des noeuds des causes et des effets et les valeurs des *forces de causalité* entre ces noeuds.

Niveau d'instructions et taxonomie des méthodes
L'exécution des méthodes des tâches du niveau *macroinstructions* se décompose en chaînes d'instructions associées aux différentes activités nécessaires pour construire le modèle géométrique paramétrique de la scène sous conception. Les instructions sont interprétées par l'interpréteur *IntpSOML* faisant partie de l'environnement.

Les types principaux des instructions constituent les sous-langages de *Génération et intégration de scènes*, de *Configuration de scènes*, de *Edition (Modification de scènes, Modification de contexte - scène initiale englobante)*, d'interrogation (*Consultation des bases graphiques, de données et de connaissances*). Les instructions de génération et d'intégration des primitives sont les outils de construction de scènes à partir de primitives géométriques et photométriques canoniques et opérations de construction CSG et assemblage par résolution de contraintes. Génération et intégration de scènes - mots réservés: génère simple, génère complexe, génère contexte, génère boîte.

Langage d'édition de scènes

Edition de scènes - mots réservés: place, déplace, efface, rote contrainte, repositionne;
Modification de scènes - mots réservés: modifie taille, modifie orientation, initialise; Modification de contexte - mots réservés: modifie observation, modifie lumière, modifie texture;
Prise de connaissances - mots réservés: crée scène, affiche géométrie, affiche base primitives, affiche connaissances, affiche config. Spatiale, rendu image, visualise scène

Commandes. Le niveau des commandes dépend du type du modeleur géométrique utilisé et spécifie le format des primitives prévues pour ce modeleur. La validation logiciel à ce niveau de l'approche, SOML est basée sur un modeleur de solides supportant d'opérations CSG régularisées étendues, construites à base d'utilitaires disponibles dans le domaine public d'Internet.

Les classes de primitives géométriques paramétriques et syntaxe d'une commande:

commandes de primitives - mots réservés sphere, box,

search complements the use of SOML in the declarative design of scenes.

Knowledge and mastery of these tools enable the architect to shed new light on design problems, improve classical design methods, and speed up the development of new methods. Through computer use, architecture will be able to evolve towards the goal of establishing a link between classical and modern methods (De Paoli 1996, Miaoulis 1996).

references

- Allen, J. F., 1983. "Maintaining Knowledge about Temporal Intervals," *Communications of the ACM*, vol. 26, n° 11, 832-843, 1983
- Argués, Didier, and Stéphane Aubert, 1994. "Modélisation de scènes tridimensionnelles pour l'animation en synthèse d'images: notion d'arbres ECSG et computation," *AFIG'94, Toulouse*.
- Brunetti, Gino, Ana Sofia Viera, and Jivka Ovtcharova, (). "Towards a Feature Description language."
- Caponi, Cecile, 1995. "Identification et explicitation des types dans un model de connaissances à objets," *These en Informatique LIFIA/IMAG*.
- Charman, Ph., 1995. *Gestion des contraintes géométriques pour l'aide à l'aménagement spatial*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Chen, Hiangpiung, 1995. *Representatin, Evaluation and Edition of Feature-based and Constraint-based Design*. Doctoral Dissertation, Purdue University.
- Clay, Sharon, and Jane Wilhelms, 1996. "Put: Language-Based Interactive Manipulation of Objects," *IEEE Computer Graphics and Applications*.
- Christian, Colin and Emmanuel Desmontils, Jean-Yves Martin, Jean-Philippe Mounier, 1997. "Modélisation déclarative: Vision de l'utilisateur," *Rapport de recherche, Ecole des Mines de Nantes 97-8-INFO, IRIN-152*.
- De Paoli, Giovanni, and Alain Marty, 1996. "Architecture, simulation informatique et création industrielle," *rapport de recherche, Ministère de l'enseignement supérieur, Québec*.
- Dif, Jean, 1996. "Images 3D," *Sybex*.
- Desmontils, 1995. "Les modeleur déclaratifs," *RR IRIN, Nantes*.
- Donikian, Stéphane, 1992. *Une approche déclarative pour la création de scènes tridimensionnelles: applications à la conception architecturale*. Thèse à l'Université de Rennes 1.
- Dubois, Didier, and Henri Prade, 1995. "Fuzzy relation equations and causal reasoning," *Fuzzy sets and systems, 95:119-134*.
- Foley, et al, 1995. *Introduction à l'Infographie*.

```

cylindre, cône, plane, etc.
sol_scene := language_directives camera
           {camera_items} object_statements
           atmosphere_statements
           global_statements {global_items}

commande ::= [#declare] [name alpha] [=object]
           [{PG1} name alpha {operation}]
opération ::= transform "<" vecteur ">"
vecteur ::= {axe index [PG1 name]}
axis ::= X | Y | Z
index ::= s | r | t
transform ::= scale | rotate | translate [object {}] name
           transform TrS [name]}

```

scénarios d'exécution

Les scénarios de conception déterminent la séquence possible d'activités des tâches, prévues dans le modèle conceptuel de la scène. Un exemple de tel scénario est montré dans la Figure 12. Les étiquetés au dessus des flèches reflètent l'ordre d'exécution des différentes étapes.

Pour faciliter la représentation du scénario de configuration spatiale, nous proposons le formalisme diagrammatique basé sur l'utilisation de symboles graphiques, montrés sur la Figure 13. L'avantage de cette approche consiste dans la possibilité de créer un langage et une grammaire de structures permettant la production d'autres structures spatiales.

Il est possible d'en avoir plusieurs scénarios pour la construction de la scène ciblée. Ils font partie des connaissances méthodologiques, expliquées ci-dessus. Un scénario est constituée d'une séquence de méthodes ciblées d'exécution des tâches de la scène. Il peut être compilé soit automatiquement à partir du modèle global des connaissances de la scène, soit composé et modifié avec les outils SOML de la couche Instructions.

résultats d'expérimentation

A titre d'illustration des idées mentionnées et présentées ci-dessus, dans les Figure 15-18, nous présentons l'extrait d'un exemple de conception de la scène du jouet de bois «train». La description des propriétés connues (Figure 16) seront converties dans un ensemble d'instructions SOML (Figure 16), constituant les méthodes de construc-

tion (Figure 17).

conclusion

La création d'un logiciel d'aide à la conception de scènes est une tâche difficile vis à vis de la complexité des problèmes sous-jacents. En effet les exigences de fonctionnalité font de lui un système informatique regroupant plusieurs objets et méthodes de traitement. Les avantages potentiels provenant de l'utilisation du langage résident dans ses fonctionnalités permettant une assistance à toutes les étapes du processus de conception de scènes complexes.

Outre les résultats initiaux encourageants, il reste encore à améliorer le niveau d'application des techniques cognitives de représentation et exploitation des connaissances, l'intégration d'apprentissage Bayésien, le perfectionnement des vocabulaires (création d'une base de connaissances terminologiques - BCT, qui va faciliter l'utilisation du langage SOML pour différents types d'application envisagés), des schémas linguistiques et la convivialité de l'environnement de travail.

À ce propos, nous avons déjà souligné que le langage SOML permet la création de modèles de scènes (géométriques, configurations topologiques, d'aspect réaliste, de méthodes de construction etc), qui peuvent être postérieurement modifiées dans les étapes successives de l'évolution de la conception. Or, la tâche la plus importante du concepteur est de préciser les objectifs souvent flous et ambigus, définis par le client ou par les spécialistes d'autres domaines, satisfaire à ces objectifs et ainsi identifier le dessein fondamental d'un système (Rivero 1977).

Figure 2-1. Image de la scène final "train" obtenue par une séquence d'activités exécutés selon un scénario de conception.

Nous pouvons entrevoir, en analysant la tâche du concepteur, une utilisation du langage SOML comme outil d'aide à la conception en architecture. En effet, au début de l'idée architecturale, pour communiquer avec un client, l'architecte utilise le croquis qui est un rapport entre un concept et la réalité des choses. C'est par ce croquis qui évolue, que nous pouvons dire qu'un langage qui tient compte de la description déclarative du concept

- New York, NY: Addison-Wesley
- Gascuel, 1996. "Fabule : Un environnement de recherche pour l'animation et la simulation," *iMAGIS/IMAG-INRIA*.
- Gatenby, Neil, Martin Preston, and W. T. Hewitt, 1993. "The Manchester Scene Description Language," *CGU 88*, Manchester Computing Centre.
- Geode, 1997. Web serveur Geode: <http://www.emn.fr/dept.info/GEODE/welcome.html>.
- Gomes, Jonas, and Bruno Coste, Lucia Darsa, Luiz Velho, 1996. "Graphical objects," *Visual Computer*, 12:269-282.
- Gomes, and Velho, 1995. "Velho Abstraction paradigms for computer graphics," *Vis Computer* 11:227-239.
- Kehrer and Vaterrott, 1996. "Integration Aspects of STEP and their Expression in the CAO Reference Model," *Modellings and Graphics in Science and Technology*. Springer.
- Lai, Michael, 1997. "UML La notation de modélisation objet. Application en JAVA," *Inter Edition*.
- Lucas, Michel, 1990. "Emmanuel Desmontils, Les modeleurs déclaratifs," *Review de CFAO*.
- Mäntilä, Martti, 1988. *Introduction to Solid Modeling*. Computer Science Press.
- Martin, P., 1989. "Un système de génération déclarative de polyèdres." rapport N 89-02, LISIT, Université de Nantes, juin 1989.
- Miaoulis, Georges and Dimitri Plemenos, 1996. "Le projet MultiCad," Rapport de recherche MSI 96-03.
- Oussalah, Chabane, 1997. "Ingénierie Objet," *Interedition*.
- Peng, Yun and James A. Reggia, 1990. *Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving*. Springer-Verlag.
- Plemenos, Dimitri, 1991. *Contribution à l'étude et au développement des techniques de modélisation, génération et visualisation de scenes*. Thèse de doctorat d'état en informatique, Université de Nantes.
- Paolo, Portoghesi, 1981. *Au-delà de l'architecture moderne*. Editions de l'équerre, Paris.
- Rivero, Victor, 1977. *Une contribution à la conception architecturale assistée par ordinateur*. Thèse de doctorat Institut Polytechnique, Grenoble.
- Schmeltzer, 1995. *Modélisation de cartes génomiques. Une formalisation et un algorithme de construction finale sur le raisonnement temporel*, Thèse, L'université J. Fourier, LIFIA/IMAG.
- SGDLsoft, 1995. *Manuel de SGDLsoft*. S.G.D.L. Technology S.A., Lyon.
- Thalman D., 1988. "Les systèmes de synthèse et d'animation des images de MIRALab," in T. Lieblins and H. Röthlisberger (eds), *Infographie et applications*. Masson.
- Trousse, Brigitte, 1989. *Coopération entre systèmes à base de connaissances et outils de CAO : l'environnement multi-agent ANAXAGORE*. Thèse de Doctorat de l'Université de Nice Sophia Antipolis.
- Vargas, Cataline, 1995. *Modelisation du processus de conception en Ingénierie des systèmes mécaniques*. Thèse en Informatique, Ecole Normale Supérieure de Cachan.

initial et de la possibilité de raisonner d'une façon qualitative et quantitative sur les propriétés du modèle s'apparente au processus de conception en architecture. Nous voyons dans ce langage un outil basé non seulement sur la production des images synthétiques réalistes de scènes 3D (dessins), mais aussi sur leur formation. Selon cette démarche, la forme n'est pas la résultante d'une analyse-solution, ni d'une simple liste de fonctions, mais elle est le résultat d'une activité cybernétique. Les fonctions (activités) sont considérées comme un procédé de vérification de l'idée architecturale, la préfiguration mentale d'un problème à travers la représentation évolutive de la forme (Portoghesi 1981).

L'adoption de l'ordinateur par les concepteurs pousse la recherche vers des systèmes manipulant à la fois des connaissances sur les composants de la scène et aussi sur le processus de conception lui-même. Ceci facilite les étapes d'analyse, de synthèse et d'évaluation du design dès le début de la phase de conception. Ces nouveaux systèmes se distinguent par le type de raisonnement basé sur des inférences (déductions, abductions, ou CSP) et l'utilisation d'une approche symbolique plutôt que d'un calcul numérique. Ce qui contribue à rendre le processus de design explicite et plus transparent. Plusieurs autres recherches se sont déjà orientées dans cette direction, notamment celles du GRCAO et du GEODE (Groupes de recherches en CAO), qui proposent l'utilisation des méthodes de modélisation basées sur la description déclarative du processus de construction et la traduction informatique de ce processus, ce qui permet de rendre le modèle totalement paramétrable (SGDLsoft 1995). Nous pouvons ainsi produire des simulations et une interaction entre l'oeil de l'architecte et la forme de l'objet. Ces démarches trouvent leur complémentarité avec celle du SOML pour la conception déclarative des scènes.

La connaissance et la maîtrise de ces outils pourront apporter à l'architecte un nouvel éclairage aux problèmes de la conception architecturale, l'aider à améliorer les méthodes classiques et accélérer la mise au point de méthodes nouvelles dans l'élaboration du projet architectural. Par le biais de l'informatique, l'architecture pourra évoluer vers un projet qui consiste à établir un pont entre

les méthodes architecturales classiques et les nouvelles (De Paoli 1996; Miaoulis 1996).

POSTFACE

Il ne reste plus de faisan à la crème et champignons sauvages dans mon assiette et les convives terminent leur repas ... :

«Émile :

- Votre conception de la science est de l'ordre du bricolage...

Max :

- Je ne m'opposerai pas à ce jugement. La science relève du bricolage parce que la vie humaine n'est qu'un long, et parfois pénible, bricolage.»¹

¹ JAVEAU, C., *Conversation de MM. Durkheim et Weber sur la liberté et le déterminisme lors d'un passage de M. Weber à Paris*, Les Éperonniers, Paris, 1989, pp. 38-39