

# Modélisation architecturale et outils informatiques entre cultures de la représentation et du savoir-faire

720.2840113  
A84922m  
2000

1999



Sous la direction de  
Giovanni De Paoli et Temy Tidafi



Acfas

LES CAHIERS SCIENTIFIQUES

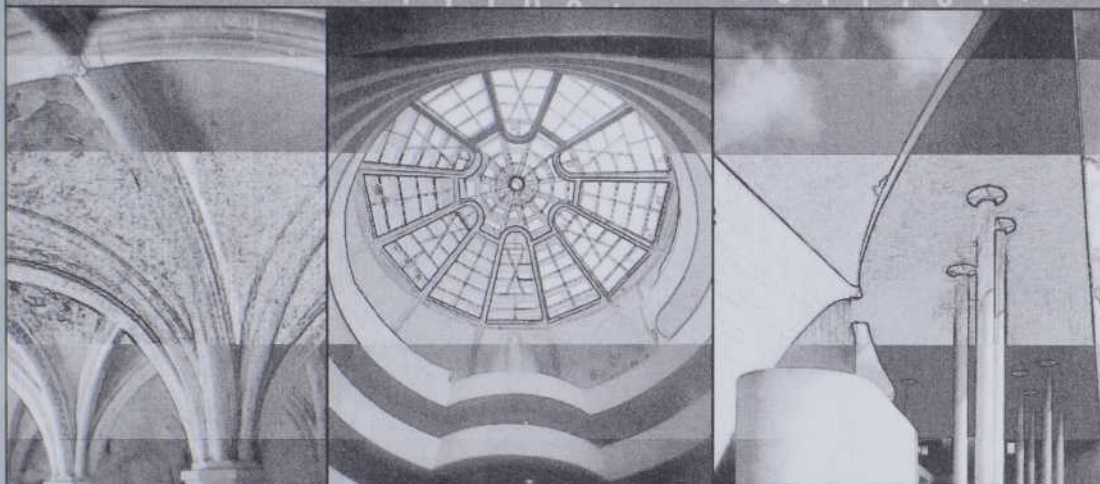
95



Bibliothèque Nationale du Québec

67<sup>e</sup> Congrès de l'Acfas

# Modélisation architecturale et outils informatiques entre cultures de la représentation et du savoir-faire



Sous la direction de  
Giovanni De Paoli et Temy Tidafi

Groupe de recherche en CAO  
Faculté de l'aménagement  
Université de Montréal



Acfas

LES CAHIERS SCIENTIFIQUES

95

*ÉDITION:*



Association canadienne-française  
pour l'avancement des sciences

425, rue De La Gauchetière Est  
Montréal (Québec)  
H2L 2M7  
(514) 849-0045

*DISTRIBUTION EN LIBRAIRIE :*

Fides  
165, rue Deslauriers  
Saint-Laurent (Québec)  
H4N 2S4  
Téléphone : (514) 745-4290  
Télécopieur : (514) 745-4299

*GRAPHISME DE LA PAGE COUVERTURE :*

Nathalie Proulx

NA  
2728  
A77  
1999

© 2000 Acfas  
Dépôt légal 2<sup>e</sup> trimestre 2000  
Bibliothèque nationale du Québec  
Bibliothèque nationale du Canada

*Voir données de catalogage avant publication (CIP) au couvert III*

## Table des matières

### Préambule

<i>Du développement du projet architectural aux nouvelles perspectives informatiques</i> <b>Temy Tidafi et Giovanni De Paoli</b> .....	1
---	---

### 1. Développement du projet et impacts sur l'outil informatique

<i>Instruments et intentions du projet architectural</i> <b>Irena Latek</b> .....	9
<i>Modélisation par actions d'objets-type en architecture</i> <i>Vers un environnement informatique favorisant la conception assistée par ordinateur</i> <b>Ivanka Iordanova, Temy Tidafi</b> .....	17
<i>Entre description verbale et modélisation géométrique en design : magie ou réalité ?</i> <b>Elvire Q. Wang</b> .....	37

### 2. Méthodes de modélisation et changement de paradigme

<i>Conception assistée : modélisation et interprétation</i> <b>Michel Léglise</b> .....	51
<i>De la modélisation du processus de construction à la construction du processus de modélisation</i> <b>Marius Bogdan, Giovanni De Paoli</b> .....	67
<i>Réflexion sur une uniformisation de données pour la description d'objets physiques</i> <b>Manon Guité, Claude Parisel</b> .....	77

### 3. Outils informatiques et développements

<i>Formes pascaliennes : géométrie descriptive des formes gauches, éléments</i> <b>Alain Marty</b> .....	101
---	-----

<i>Vers une modélisation spatiale hybride en conception déclarative des scènes 3 D</i> <b>Lozka Popova</b> .....	139
---	-----

### 4. Expérimentation en pédagogie et nouvelles perspectives

<i>Modélisation 3D avec form•Z</i> <i>Nouveau support à la conception architecturale en atelier de première année</i> <b>Myriam Blais, Jacques White</b> .....	171
--	-----

<i>Des outils intelligents en architecture et de la technologie Kansei</i> <b>Geneviève Bosvieux Coilliot</b> .....	185
--	-----

## Du développement du projet architectural aux nouvelles perspectives informatiques

Giovanni De Paoli† et Temy Tidafi‡

*Groupe de recherche en conception assistée par ordinateur (GRCAO)*

*Université de Montréal, Canada*

† *Giovanni.De.Paoli@Umontreal.CA*

‡ *Temy.Tidafi@Umontreal.CA*

L'informatique et ses applications réussissent à occuper une place grandissante dans les agences d'architecture ainsi qu'au niveau de l'enseignement et de la recherche en architecture. La table à dessin est remplacée par des outils électroniques qui offrent et ouvrent des possibilités nouvelles tant au niveau de la présentation et de la communication de projets d'architecture que de la conception ou de l'évaluation de ces projets. Ce changement des outils de travail en architecture nous amène progressivement à considérer la définition d'un nouveau paradigme qui va être accompagné de nouvelles pratiques pour la conception, la communication et la figuration architecturales. Ainsi, le mot clé « dessin », si longtemps et souvent associé à la conception et à la communication architecturales, est lentement substitué par un terme nouveau, la « modélisation ». Cette substitution de termes nous semble loin d'être anodine et peut, en fait, cacher une révision de concepts et d'approches en architecture que nous soupçonnons pouvoir se répercuter au niveau des méthodes et des finalités recherchées pour la figuration pendant un processus de conception architecturale.

Alors que le dessin favorisait une culture de la représentation, en ce sens où il permet la description d'un résultat de conception, les possibilités informatiques permettent de soutenir également une culture du savoir-faire à l'origine de la production d'un objet, comme un bâtiment. Au moyen de langages évolués (i.e. fonctionnels, etc.), il est possible de considérer la genèse d'un objet et revenir sur un processus de conception.

Cet ouvrage est le compte rendu de contributions présentées lors du colloque Modélisation architecturale et outils informatiques entre cultures de représentations et du savoir-faire qui a eu lieu à l'Université d'Ottawa, le 12 mai 1999, dans le cadre du 67<sup>e</sup> Congrès de l'Association canadienne-française pour l'avancement des sciences (ACFAS). Les chercheurs, les professeurs, les professionnels ou les concepteurs étaient invités à identifier et à réfléchir sur les approches et les concepts émergents de l'introduction ou de la définition d'outils informatiques de plus en plus au service de l'architecture. Par exemple, ils devaient tenter de répondre à :

- Quels sont ces approches et leurs fondements théoriques en architecture ?
- Quels sont les méthodes de modélisation et leurs résultats probables pour la conception architecturale ?
- Comment est-ce qu'il est possible de traiter de la complexité d'un processus de conception au moyen de ces nouveaux outils et méthodes ?

Ces questions et bien d'autres ont donné lieu à de nombreuses discussions ayant permis l'exploration du rapport entre une culture de la représentation bien acquise et une culture du savoir-faire à découvrir en relation au processus de conception et à son enseignement. Pour rendre compte des discussions et des présentations du colloque, nous avons regroupés les textes retenus des participants autour de quatre principaux thèmes décrits ci-après :

### **1. Développement du projet et impacts sur l'outil informatique**

La partie consacrée au développement du projet et ses impacts sur l'outil informatique comprend deux articles discutant des rapports entre la représentation architecturale et les paradigmes en architecture. Il s'agit de la représentation architecturale considérée par rapport à sa relation au produit, le bâti, d'une part, et d'autre part, à son emploi pendant un processus de conception.

Le premier, *Instruments et intentions du projet architectural*, nous resitue dans l'histoire récente du XX<sup>e</sup> siècle pour nous permettre de mieux comprendre l'émergence des paradigmes en vigueur. Il tente, à partir de développements paradigmatiques de ce siècle, d'examiner comment certains instruments spécifiques contribuent à définir les qualités des lieux et de la forme de l'espace. Le second, *Modélisation par actions d'objets-type en architecture*, s'arrête sur les actions et les aspects cognitifs présents pendant un processus de conception. Il s'agit d'une réflexion sur la façon de concevoir en

architecture de manière à établir un devis pour la définition d'un outil informatique susceptible d'assister la conception. Le troisième *Entre description verbale et modélisation géométrique en design : magie ou réalité ?* souligne que la modélisation géométrique conventionnelle n'est pas suffisante pour une intégration de la modélisation à un processus de conception.

## 2. Méthodes de modélisation et changement de paradigme

La deuxième partie interroge davantage les méthodes susceptibles de soutenir l'activité de conception et va jusqu'à soulever les problématiques liées à la gestion des modèles numériques élaborés. Par les trois articles logés dans cette partie, l'intention est de souligner l'importance de la façon de modéliser une connaissance non pas seulement pour la réalisation d'un projet architectural mais également pour la contribution qu'elle peut ensuite apporter à la prise de décision et à la simulation de phénomènes susceptibles de se produire autour du projet, une fois concrétisé.

Au lieu de focaliser sur l'instrument, l'article *Conception assistée : modélisation et interprétation* change de registre traditionnel, habituellement axé sur l'outil, et accorde toute l'attention au concepteur pour essayer d'esquisser le dispositif qui va lui permettre d'accomplir au mieux sa tâche. Il s'agit de stimuler le travail de conception et non plus d'offrir uniquement une information relative à la solution architecturale en développement. L'article *De la modélisation du processus de construction à la construction du processus de modélisation* tente en quelque sorte une approche similaire d'intégration de la connaissance en insistant plus sur le besoin d'une modélisation d'actions et de processus. Avec l'intitulé *Réflexion sur une uniformisation de données pour la description d'objets physiques*, le dernier article de cette partie met en évidence les lacunes des représentations produites à l'aide des logiciels actuels et souligne l'importance d'une révision de cette façon de faire. À partir d'une expérience concrète, l'article esquisse une approche à la modélisation nouvelle permettant d'aller au-delà de la simple visualisation d'objets physiques.

## 3. Outils de modélisation et développements

La troisième partie de l'ouvrage montre bien que les fondements théoriques et mathématiques des outils informatiques disponibles sont loin d'être définitifs. L'article *Formes pascaliennes – géométrie descriptive des formes gauches, éléments* tire avantage des possibilités informatiques pour revenir sur certains concepts géométriques laissés de côté, faute notamment de moyens adéquats. Il propose une approche unitaire et intuitive permettant la définition de surfaces gauches susceptibles d'améliorer grandement la construction de formes complexes à l'aide de trois opérateurs géométriques uniquement.

En informatique, les révisions dans la façon d'aborder les problèmes de modélisation sont également à l'ordre du jour. C'est la question qualitative des modèles tridimensionnels qui retient l'attention. Dans l'article *Vers une modélisation spatiale hybride en conception déclarative des scènes 3D*, une avenue à la description qualitative des configurations spatiales est suggérée. La résolution des problèmes de contraintes relationnelles et temporelles, l'intégration de bases de connaissances, la concentration sur la cohérence d'une description sont autant de dimensions qui prennent le dessus sur les aspects quantitatifs et visuels au centre d'intérêts de la plupart des outils développés pour la modélisation d'objets physiques.

#### **4. Expérimentation en pédagogie et nouvelles perspectives**

Les travaux de recherche et leurs résultats peuvent aboutir sur la mise en marché de produits nouveaux qui à leur tour peuvent également inciter à réfléchir sur de nouvelles formules pédagogiques en architecture. L'article *Modélisation 3D avec form•Z* relate une expérience pédagogique menée au sein d'un atelier d'une école d'architecture. Il démontre que les étudiants d'architecture introduits dès leur première année aux outils informatiques abordent la conception d'une manière plus itérative qu'avec les moyens de représentation traditionnels, comme le dessin ou la maquette. Il montre aussi que ces outils permettent aux étudiants de faire évoluer plus rapidement leurs projets et d'en apprécier les espaces, ce qui les incite à les travailler davantage.

L'article *Des outils intelligents en architecture et la technologie Kansei* ouvre la voie à des perspectives nouvelles en matière d'interface homme-machine. Il montre que nous sommes à la veille de pouvoir faire contribuer davantage nos sens au moment de la conception architecturale.

#### **Vers de nouvelles définitions**

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 dimension prennent leur place. 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.

Les recherches présentées sur les langages informatiques confirment l'importance d'avoir et de créer un langage de communication qui permette la figuration de l'objet architectural. Ce langage 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.

Une piste de développement est donc 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 construction.

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.

L'informatique prend sa place dans ce processus en devenant une discipline dont le but est fédératif. 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 le modèle qui sera traité par l'ordinateur, et 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.

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 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. 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.

Tous les modeleurs 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.

Un changement d'approche dans la conception des modeleurs (logiciels) sera de réaliser des systèmes de conception capables de manipuler dans un même modeleur 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.

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 pas être considérée seulement comme une méthode de résolution de problèmes et que les outils de CAO sont trop lourds à manipuler et pas suffisamment commodes pour manipuler des objets complexes ou encore non complètement définis.

Nous constatons aussi 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. Ces nouveaux systèmes d'aide à la conception nous permettront de mieux répondre à une partie des questions posées tout au long de ce colloque.

En terminant 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. Ces réflexions doivent amener à anticiper les changements qui enrichiront le savoir de demain.

## **Remerciements**

La préparation de ce colloque a été possible grâce à la collaboration financière et le soutien logistique du comité organisateur du 67<sup>ème</sup> Congrès annuel de l'Association canadienne-française pour l'avancement des sciences (ACFAS) et de l'Ambassade de France à Ottawa. Nous tenons à remercier toutes les personnes de ces organismes qui ont apporté leur soutien à l'organisation de notre colloque.

Nous tenons également à remercier chaleureusement tous les participants et principalement tous les auteurs des articles de cet ouvrage qui ont permis d'immortaliser les présentations de notre colloque. Un merci tout à fait spécial à nos deux conférenciers invités, M. Michel Léglise de l'École d'architecture de Toulouse et M. Alain Marty de l'École d'architecture du Languedoc-roussillon, qui sont venus de France partager avec nous leurs idées et qui ont su animer avec beaucoup de compétence, d'esprit de synthèse et d'enthousiasme la table ronde à la fin du colloque. Nous n'oublions pas, non plus, le travail remarquable des membres du comité de lecture qui, par leurs suggestions et commentaires, ont permis aux auteurs de corriger et de préciser certaines idées exprimées dans le présent ouvrage.

Enfin, c'est grâce aux initiatives et à l'implication active du Groupe de recherche en conception assistée par ordinateur (GRCAO) ainsi qu'à l'appui financier de la Faculté de l'aménagement de l'Université de Montréal que ce colloque et la réalisation de cet ouvrage ont été rendus possibles.



## **Instruments et intentions du projet architectural**

**Irena Latek**

*Professeur agrégé, École d'Architecture, Université de Montréal*

**Résumé.** *Cet article se propose de discuter le rapport entre la représentation architecturale et les paradigmes de l'architecture. Plus particulièrement je tente d'examiner comment les instruments spécifiques du projet urbain contribuent à générer les qualités spécifiques du lieu et à donner la forme spécifique de l'espace. Soulevant un point stratégique de l'histoire récente, ce travail constitue une étude pilote pour une recherche plus large prenant pour objet l'architecture et l'urbanisme du XX<sup>e</sup> siècle.*

### **1. Architecture et représentation architecturale**

Les liens qu'entretiennent le projet architectural (urbain) et l'objet qu'il vise à réaliser cachent généralement le fait que les deux, le projet et le bâtiment (ville), restent relativement autonomes et rattachés à leurs univers respectifs. Pendant le processus créatif, la conscience de leur autonomie est atténuée par le fait que du point de vue des finalités, ils sont analogues. Cependant, l'histoire de l'architecture regorge de moments où la distance entre le projet (ensemble des représentations produites au cours du processus créatif) et son référent (objet potentiel à construire, ensemble des aménagements ou transformations envisagés) ressort à travers les divers problèmes de la théorie architecturale. À cet égard, la polémique qui opposa au XVII<sup>e</sup> siècle Claude Perrault et François Blondel, rapportée par Boudon et Pousin, éclaire particulièrement bien ce problème<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> BOUDON, P. et POUSIN, F., *Figures de la conception architecturale : manuel de figuration graphique*, Paris, Dunod, 1988.

Selon Blondel, l'architecte doit adapter les proportions des éléments du bâtiment aux conditions de la vision, sur la base des règles de la perspective. Donc, les proportions idéales établies en géométral, doivent être, dans une seconde étape, corrigées, soumises au principe de l'ajustement optique. Perraut, par contre, inspiré des conceptions cartésiennes, privilégie la rationalité de la conception. Il soutient ainsi que les proportions idéales s'élaborent dans l'espace du dessin.

Cette divergence théorique démontre clairement que l'architecte, en proportionnant le dessin, proportionne *de facto* le bâtiment, mais sur un mode qui distingue la représentation figurée de la réalité perçue<sup>2</sup>. Le rapport entre la figuration et la perception visuelle évoqué par Boudon et Pousin, suggère que les autres préoccupations du projet et sensations de l'espace vécu peuvent entamer encore d'autres rapports encore plus diversifiés entre la représentation et le référent qu'elle vise. Il est alors important, pour tout travail théorique en architecture, de retenir que le dessin n'est pas une image simple et neutre du bâtiment.

Dans l'histoire de la ville, une rupture nette de la forme de l'espace urbain se dessine avec les travaux des avant-gardes modernes et avec l'avènement de l'urbanisme moderniste. À ce moment s'effectue un renversement du rapport plein / vide dans la forme de la ville. Ce nouveau rapport sur le plan qualitatif modifie le degré d'investissement compositionnel du vide (espace non bâti) enduisant une toute autre conception de l'espace public. Au même moment s'instituent les nouveaux outils de la représentation et de la planification de la ville qui opèrent par un haut degré d'abstraction (schémas de la circulation, schémas du zonage, etc.). Ils s'éloignent de la forme concrète de la ville et introduisent une toute autre figuration symbolique que celle du passé. Le plan de zonage, et non pas la carte du tissu urbain, le plan de masse, et non plus le plan de lotissement / monuments, deviennent les instruments dominants de la représentation, de la planification et de la réalisation des ensembles urbains. La forme de l'espace est radicalement modifiée. Le moment clé de ce changement, qui est à la fois un point charnière dans le développement des instruments conceptuels et des techniques de représentations, est constitué par les réalisations des C.I.A.M. 4.

## 2. Projet radical du C.I.A.M. 4 et ses instruments conceptuels

Rappelons brièvement que le C.I.A.M. 4, tenu sur le bateau Patris II en croisière entre Marseille et Athènes et ensuite à Athènes, s'est déroulé entre le 29 juillet et le 13 août 1933. Le débat sur la cité fonctionnelle prend donc place sur un navire, loin de la réalité

---

<sup>2</sup> BOUDON, P. et POUSIN. Op. cit., p. 32.

concrète d'une ville, dans les conditions idéales d'un laboratoire des idées. Même s'il ne s'agit là, assurément, que d'une simple coïncidence, due à l'annulation tardive de la tenu du congrès à Moscou, il est impossible de ne pas s'étonner de la surprenante affinité entre cette situation et le climat général des idées qui y prennent place.

La rencontre est précédée par un travail préparatoire de deux ans consistant en une série d'études. Effectuées par les 18 équipes nationales, elles ont pris pour objet des villes contemporaines ayant des caractères divers, situées dans divers pays et sur plusieurs continents. Ce travail appuyé sur la diversité des types, origines, évolutions historiques et conditions économiques, a permis, comme souligne José Luis Sert, de déduire les principes généraux qui constituent la Charte de l'urbanisme formulée lors des congrès<sup>3</sup>. Les 33 exemples des villes contemporaines sont des études standardisées impliquant les mêmes outils conceptuels et les mêmes modes de représentation à travers tous les cas étudiés. Oeuvres sans précédents, ils constituent aussi une preuve indéniable de l'universalisme des C.I.A.M.

Les instruments dont ce travail va bénéficier ont essentiellement un triple caractère. D'un côté, le développement du champs de la statistique a permis de l'approprier comme méthode scientifique de l'analyse urbaine, et d'un autre côté, la camera et l'avion ont permis le relevé photographique du problème étudié; enfin tous ces nouveaux outils de recherche sont mis au service du nouveau paradigme qui établit l'analogie entre la ville et l'organisme vivant. Ce savoir intègre dorénavant la mobilité et le changement, tout en considérant les villes «comme des organismes vivants qui naissent et se développent, se désintègrent et meurent» (pour reprendre les mots de Sert).<sup>4</sup> Ce modèle confère à l'analyse urbaine un rôle important, cependant il implique une perspective sélective, indiquée par l'analyse des conditions de la vie humaine que la ville abrite.<sup>5</sup>

L'image exclusive ressortant de l'étude de l'état actuel de 33 villes, et reportée dans les documents des C.I.A.M., est celle du chaos de la ville moderne, devenue un milieu incapable de satisfaire les besoins primordiaux biologiques et psychologiques de l'homme. Devenues urgentes, les réformes ne pourront être implantées et conduites qu'à travers un plan général directeur ou régulateur. Les plans effectués pour les 33 villes, qui analysent

---

<sup>3</sup> SERT, J. L. *Can our cities survive? An ABC of urban problems, their analysis, their solutions*, Nendeln, Kraus Reprint, 1979 (première édition : Cambridge, Mass., The Harvard University Press, 1944).

<sup>4</sup> SERT, J. L., *Op. cit.*, pp. 2-3.

<sup>5</sup> Ces analyses, basées principalement sur des schémas statistiques, des photos reportages, des vues d'avion, examinent les problèmes d'insalubrité, de surpeuplement, de pollution, d'insécurité, de travail, de circulation, etc. Voir à ce propos, J.-L. SERT, *Op. cit.*, et *C.I.A.M. Internationale Kongresse für Neues Bauen, Congrès Internationaux d'Architecture Moderne, Dokumente 1928-1939*, herausgegeben von Martin Steinman, 1979 Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart.

l'état actuel et dénotent les modifications projetées, constituent, justement, l'ébauche d'un tel outil.<sup>6</sup>

Si les méthodes amenées aux C.I.A.M. 4 ne sont pas vraiment nouvelles, l'échelle des études, le nombre des activités coordonnées et surtout les modes de représentation mis en place constituent un pas décisif dans le développement des instruments de l'urbanisme moderne.

### 3. Dessins et ses analogues

Les 33 cartes à l'échelle de 1 : 10 000 introduisent un nouveau code. 39 catégories descriptives ont été identifiées et ensuite associées aux signes graphiques abstraits. Sur le plan, l'ensemble du territoire de la ville a été figuré en zones fonctionnelles. Le zonage, bien que très détaillé, correspond, en grandes lignes, au découpage entre les trois fonctions vitales essentielles : l'habitation, le travail et les loisirs. Suivant un tel mode de représentation de la ville, l'agencement des zones sur un territoire plus large forme une composition discontinue, indifférente de la composition réelle de l'espace que le plan décrit.<sup>7</sup>

Dans chaque catégorie, une distinction graphique est faite entre l'état existant et l'état projeté. Chaque territoire est donc soit existant, soit projeté. Le plan ainsi présenté ne peut être lu sans légende. Par ailleurs, les légendes élaborées en trois langues, trahissent l'universalité des catégories descriptives. Certaines catégories, qui sont appropriées juste à une langue, dénotent subtilement la spécificité culturelle d'un phénomène qui n'apparaît qu'au sein d'une communauté linguistique.

En somme, les 33 études instaurent une convention de la représentation hautement abstraite. La figuration graphique est schématique mais précise dans ses intentions. Le code graphique standardisé reflète les outils conceptuels qu'il sous-tend. La figuration

---

<sup>6</sup> Voir, à titre d'illustration, les analyses urbaines d'Amsterdam, de Zurich, et de Barcelone, plans de zonage se trouvant dans les archives de Institut für Geschichte und Theorie der Architektur (gta) - ETH, de Zurich, et reproduits dans COHEN, J.-L. (sous la direction de), *Les années 30; l'architecture et les arts de l'espace entre industrie et nostalgie*, Paris, Éditions du patrimoine, 1997; *C.I.A.M. Internationale Kongresse für Neues Bauen, Congrès Internationaux d'Architecture Moderne, Dokumente 1928-1939*, herausgegeben von Martin Steinman, 1979 Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart; et SERT, J. L. *Can our cities survive? An ABC of urban problems, their analysis, their solutions*, Nendeln, Kraus Reprint, 1979.

<sup>7</sup> Pour les légendes des plan de zonage et les catégories descriptives et analytiques du territoire, voir les mêmes références de la note 6.

abstraite articule avec cohérence le caractère mathématique des données quantitatives (statistiques) définissant la fonction d'une zone. Les formes sur le plan, qui ne simulent pas une forme de la réalité vécue, n'ont pas de fonction mimétique, et, par conséquent, on peut les définir comme auto référentielles.

D'un autre côté, consciemment ou non, la figuration graphique cherche à rejoindre le paradigme organique de la ville. Le rationalisme statistique étant défaillant à cet égard, les sources des idées et des exemples de leurs expressions plastiques pertinentes se retrouvent dans l'art. La très forte dynamique des formes mise en jeux, et les constellations des configurations discontinues sur les plans en question font penser aux recherches que l'art abstrait entreprend à la même période et dont les membres des C.I.A.M. 4 ont été indéniablement au courant, certains même instigateurs, voir auteurs.<sup>8</sup>

Une récente exposition rétrospective de l'art des années 30 (Paris 97) fait le point sur le biomorphisme, bio constructivisme et syncrétisme abstrait-concret. À la fin des années 20 et au cours des années 30 le vocabulaire plastique de l'art non figuratif se renouvelle. Les formes plus complexes tâchent de restituer les facettes multiples du monde vivant en intégrant à l'abstractionnisme l'aspect merveilleux du monde organique. Expression du rythme vital par un dynamisme impulsé à la construction du tableau (orthogonale, diagonale ou circulaire), l'élaboration d'un bio constructivisme inspiré du biomorphisme caractérise souvent ce type de travail. La facture graphique des 33 plans est très proche à ces expériences. Compte tenu de la très grande échelle des panneaux, un fragment librement choisi comme champs de perception (et exécution par l'auteur) pourrait être l'objet de la recherche des idées semblables.

---

<sup>8</sup> Nous renvoyons le lecteur particulièrement aux oeuvres suivantes : Adolphe Jean-Marie Mouron, dit Cassandre, projet d'affiche pour les vins Nicolas, 1935; Laszlo Moholy-Nagy *Constructions A16*, 1933-1934; Osvaldo Luchini, *Archipeinture*, 1935; Wladyslaw Strzeminski, *Composition uniste 14*, 1934; Paul Klee, *Horizon surélevé*, 1932; Laszlo Moholy-Nagy, *Espace CHIV*, 1938; ainsi qu'aux photos d'Andrée Steiner, *Illumination de la coupole du Grand Palais*, (Exposition Internationale de Paris 1937) et *La soufflerie de Chaloas*, 1935.

Pour un approfondissement du sujet, consulter *Années 30 en Europe, le temps menaçant 1929-1939*, Musée d'Art Moderne de la Ville de Paris, Paris, Flammarion, 1997, et COHEN, J.L. (sous la direction de), *Les années 30; l'architecture et les arts de l'espace entre industrie et nostalgie*, Paris, Éditions du patrimoine, 1997.

#### **4. Espace du dessin et espace vécu ; notes critiques en forme de conclusion**

La plasticité en question, soit-elle l'expression du symbolisme profond de la dynamique urbaine ou simple reflet du goût esthétique de l'époque, (le juger c'est le risque à prendre de ne pas distinguer l'anecdotique du fondamental lorsqu'on manque du recul nécessaire), constitue cependant une constante de l'urbanisme moderne pendant son emprise sur les pratiques de l'après-guerre. Les plans de masse des lotissements de l'époque s'apparentent aux tableaux des avant-gardes modernes de façon surprenante.

Il n'en demeure pas moins que l'approche développée dans les analyses urbaines des 33 villes débattues aux Congrès d'Athènes est empreinte avant tout de l'universalisme, du rationalisme économique, de l'interventionnisme optimiste, et de la confiance à la méthode scientifique. Les mêmes catégories descriptives sont censées dévoiler les réalités différentes, transcontinentales, mais visant le même futur meilleur. Or, la simple traduction des termes d'une langue à l'autre est en général un véritable transfert de l'expérience d'une culture vers un autre univers de la pensée. La division nette sur les plans entre l'existant et le projeté se soucie moins de décrire la nature des choses que d'évaluer les moyens à prendre pour les changer. À cet égard, rappelons que dans les plans du XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, la forme de la ville existante se prolonge dans celle du projet sans distinction, tel que dans les plans emblématiques de Chaussegros-de-Lery, le Plan des artistes, etc.). Le changement, la modification, l'amélioration, sont manifestement considérés ici l'essence du travail projectuel. Finalement, le principe d'isoler un phénomène de l'ensemble des phénomènes urbains en tant que problème étudié fournit la principale base du code de représentation développé. La donnée quantitativement prévalante établit le caractère d'une zone fonctionnelle. La méthode est éliminatoire, une figure ne peut représenter deux choses à la fois. Or toute situation et forme urbaine implique toujours une multitude des phénomènes.

Face aux modes antérieurs, le mode de représentation de la ville développé par C.I.A.M. 4, appelé plus tard le plan de zonage, invente le graphisme apte à illustrer le questionnement économique et fonctionnel du projet à une échelle nouvelle. En même temps, en tant que convention professionnelle, elle perd la capacité de figurer la forme de l'espace réel et détache ainsi (pour une longue période) la représentation de la ville de sa forme concrète, observable, vécue et mise en mémoire en tant qu'instrument de l'urbanisme. La comparaison du plan du zonage avec la photo aérienne démontre cette distance de façon éloquente. Aussi, la confrontation avec le mode d'analyse et de représentation des projets du début du XX<sup>e</sup> siècle permet-elle de saisir cette différence

essentielle. Les dessins de Berlage pour la ville d'Amsterdam en sont des exemples éloquents.<sup>9</sup>

D'un autre côté, la convention de la représentation en question constitue une proposition complémentaire aux concepts et aux instruments de l'urbanisme moderne développés peu avant les C.I.A.M. 4. Les discontinuités formelles caractéristiques du plan de zonage - chaque zone étant formellement autonome dans le tout (la ville) auquel elle appartient - permettent d'envisager sur chaque territoire une composition de l'espace indépendante. Le système répond de façon cohérente aux développements des typologies de l'îlot et de l'habitat moderne travaillé pendant les années 20 et débattu aux C.I.A.M. 2 à Francfort, puis aux C.I.A.M. 3, à Bruxelles. Il s'agit de l'innovation de l'îlot ouvert qui efface la forme de l'espace public, favorisant sa discontinuité compositionnelle spatiale. Cette dernière devient claire dans la comparaison du projet de la colonie des logements de Siemensstadt, Berlin (1929-1930), par Gropius (plan de masse) avec le plan d'extension d'Amsterdam-sud (1900-1917) élaboré par Berlage (axonométrie).

Finalement, cette discontinuité structurelle, dissolution des hiérarchies de l'espace et renversement du rapport plein / vide sur le plan, modifient considérablement le caractère de l'espace public. L'espace public est plutôt résiduel que composé et investi. Il est, en tant que figure, pratiquement non reconnaissable.

De la même manière que le plan du zonage qui s'appréhende à l'aide de la légende, l'espace public doit se lire à travers un instrument conventionnel. Aujourd'hui, dans les villes nouvelles on 'lit' l'espace à l'aide de la signalétique. Des flèches et des écriteaux nous dirigent vers l'agora, la place de la cité, vers les rues et les bâtiments publics, car la forme de l'espace en elle-même, n'est plus reconnaissable.

L'examen de ce projet emblématique, précurseur d'un instrument bien consolidé de l'urbanisme contemporain, toujours opérationnel, démontre que le projet authentique invente, à chaque fois, les moyens techniques cohérents avec les idées qu'il représente. La représentation architecturale est donc une mise en forme des idées plutôt que l'illustration de la forme bâtie. La représentation est liée aux paradigmes sociaux (idéologiques), politiques, scientifiques, culturels et artistiques auxquels se rattache la théorie architecturale à un moment historique donné. Elle est plutôt le résultat de ses relations, que la finalité de représenter le bâtiment à construire, ou le territoire à aménager.

En revanche, les modes spécifiques que la représentation développe au sein d'un paradigme architectural particulier influencent considérablement le type d'espace produit pendant le processus projectuel correspondant. Cela nous permet d'affirmer, en

---

<sup>9</sup> Les perspectives à vol d'oiseau de Berlage représentant le Plan d'extension d'Amsterdam-Sud, 1900-1917, se trouvent à Gemeentearchief d'Amsterdam. Reproduction dans DETHIER, J. et A. GUIHEUX (sous la direction de), *La ville et l'architecture en Europe 1870-1993*, Ouvrage publié à l'occasion de l'exposition présentée du 10 février au 9 mai 1994 au Centre Georges Pompidou, Paris, Éditions du Centre Georges Pompidou, 1994.

conclusion, que chaque convention de représentation engendre sa spatialité propre, voire son urbanité spécifique.

## Références

- Années 30 en Europe, le temps menaçant 1929-1939*, Musée d'Art Moderne de la Ville de Paris, Paris, Flammarion, 1997
- BOUDON, Philippe et Frédéric POUSIN, *Figures de la conception architecturale : manuel de figuration graphique*, Paris, Dunod, 1988
- C.I.A.M. - *International Kongresse für Neues Bauen / Congrès Internationaux d'Architecture Moderne, Dokumente 1928-1939*, edited by STEINMANN, Martin, Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, 1979
- COHEN, Jean-Louis, (sous la direction de), *Les années 30; l'architecture et les arts de l'espace entre industrie et nostalgie*, Paris, Éditions du patrimoine, 1997.
- Congrès Internationaux d'Architecture Moderne: 2e Francfort-sur-le-Main, Allemagne, 1929 : "Die Wohnung für das Existenzminimum"*, Nedeln, Kraus Reprint, 1979.
- DETHIER, Jean et Alain GUIHEUX (sous la direction de), *La ville et l'architecture en Europe 1870-1993*, Ouvrage publié à l'occasion de l'exposition présentée du 10 février au 9 mai 1994 au Centre Georges Pompidou, Paris, Éditions du Centre Georges Pompidou, 1994.
- LE CORBUSIER. *La Charte d'Athènes*, avec un discours liminaire de Jean Giroudoux, Paris, 1943.
- MUMFORD, Eric. "CIAM Urbanism after the Athens Charter", *Planning Perspectives*, vol. 7, no. 4, oct. 1992, pp. 391-417.
- SERT, José-Luis, *Can our cities survive?* Cambridge, Mass., The Harvard University Press, 1942.
- TSIOMIS, Yannis et HASKARIS, Yannis. *C.I.A.M. 1928-1940. Les documents de la fondation Le Corbusier*. Paris, École d'architecture de Paris-la-Villette, 1987.

## **Modélisation par actions d'objets-type en architecture** **Vers un environnement informatique favorisant la conception assistée par ordinateur**

**Ivanka Iordanova, Temy Tidafi**

*Groupe de recherche en CAO, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal*

**Résumé.** *Les règles dont les architectes se servent pendant la phase initiale de la conception d'un objet, sont parfois très vagues, implicites, appliquées différemment et dépendantes du contexte, ce qui rend complexe la tâche de leur traduction informatique et leur intégration dans un environnement de conception assistée par ordinateur (CAO). Une partie importante du « monde conceptuel » de l'architecte est constituée des images mentales auxquelles il a recours pendant la phase initiale de son projet. Ce sont des figurations d'objets-type en architecture qui portent les caractéristiques typologiques les plus significatives de choses déjà vues ou vécues. Cette communication veut proposer une nouvelle voie pour figurer le savoir-faire présent dans l'espace de conception des architectes, dans le but de le rendre disponible pendant la CAO. La modélisation d'actions par la programmation fonctionnelle est proposée comme moyen de modélisation des « objets-type » aux différents niveaux de généralité : type fonctionnel, type référence, type « gestalt-spatial » et type « expérience ». La typologie caractéristique de cas représentatifs pour chacune de ces classes d'objets-type est dégagée et modélisée par règles de composition, gestes de construction et/ou lois ou normes de fonctionnement. Cette méthodologie permet la génération de nouveaux objets à partir du savoir-faire incorporé dans l'objet analysé. Elle utilise les relations entre les objets-type et l'interaction entre eux dans le but de créer une figuration informatique intégrée, susceptible de transférer le savoir-faire, de servir comme assistant intelligent pendant la conception architecturale et d'être une source fiable d'information et d'aide à la prise de décisions pour la conservation des bâtiments.*

## 1. Introduction

Même après une vingtaine d'années de développement des outils de CAO/DAO, nous pouvons constater aujourd'hui avec G. De Paoli (1997, p.192) que: « La liberté cognitive du concepteur en situation de créativité continue à s'exercer en dehors du cadre informatique bien que l'un de ses buts soit de fournir une aide au processus de conception ». Il y a un nombre considérable de recherches qui visent à mettre l'informatique au service de la conception architecturale mais le travail d'architecte est complexe et multidisciplinaire, et les assistants informatiques développés sont souvent conçus pour assister uniquement des fractions du processus d'élaboration d'un projet.

Ainsi, W. Mitchell (1991) a développé l'idée de l'intégrité du modèle dans les systèmes de CAO. D'après lui, il est nécessaire de disposer d'une intégration pendant toutes les étapes de l'élaboration d'un projet (intégration verticale) mais aussi d'une intégration entre les domaines ayant une référence au projet (intégration horizontale). Selon l'auteur, le plus difficile est d'accomplir l'intégrité pendant les phases initiales de la conception parce que les tâches sont mal définies et la variété des informations et des processus impliqués est assez important. C'est précisément dans cette dernière phase que nous situons le sujet de notre recherche.

Notre objectif, dans le cadre de cet article, est de proposer une méthodologie pour la description informatique de certains éléments participant dans le processus de conception en architecture, afin de les rendre disponibles aux concepteurs pendant la phase initiale du design d'un objet d'architecture. Cette description a comme but de ne pas se contenter des caractéristiques physiques des éléments, mais de s'occuper aussi de leur sémantique et de leur genèse : des caractéristiques qui participent activement dans la phase initiale de la conception et qui ne doivent pas être négligées ou séparées de la représentation visuelle. Ainsi décrits, ces éléments pourront au futur être intégrés, pour devenir partie intégrante d'un assistant à la CAO ayant des atouts manquants dans les logiciels de DAO/CAO disponibles présentement.

Afin de pouvoir définir une telle méthodologie, nous verrons en première partie quelques aspects cognitifs de la conception architecturale. En deuxième partie, nous dégagerons les plus importantes caractéristiques pouvant être recherchées dans un assistant informatique pendant la phase de conception d'un projet de design. En troisième partie, nous proposerons une méthodologie pour traduire informatiquement ces caractéristiques, et en quatrième et dernière partie, nous présenterons quelques idées d'études de cas qui feront l'objet de développements futurs et qui serviront à la validation de la méthodologie proposée.

## 2. Aspects cognitifs de la conception architecturale

Pour pouvoir proposer une assistance adéquate pendant la conception d'un objet d'architecture, il est important, dans un premier temps, de comprendre les aspects cognitifs associés à ce processus.

### 2.1. Définitions de la conception architecturale

Nous comprenons la conception architecturale comme un processus engendrant un résultat, un objet physique ou un bâtiment. Cette compréhension offre l'avantage de considérer à la fois l'objet architectural et le savoir-faire permettant d'engendrer cet objet. Dans ce qui suit, nous allons essayer de caractériser cette conception.

R. Prost (1992) écrit que la conception architecturale est un processus complexe qui comprend des acteurs, souvent avec des intérêts différents, qui ont un même objectif. De cette définition il est possible de constater que la figuration d'un objet en conception nécessite un modèle qui tient compte à la fois de la complexité du processus et de l'objet, et qui est en mesure de produire des figurations différentes en fonction des besoins de différents participants à ce processus (Tidafi, 1996). R. Prost (1993) ajoute que la conception consiste à « agir en pensant et penser en agissant » (p.16), ce qui implique également un modèle dynamique et interactif.

D'autres auteurs considèrent comme primordial le côté causal et logique du processus de conception. Pour W. Mitchell (1977), il s'agit d'une opération de résolution de problèmes. Il est nécessaire de tenir compte des lois causales qui participent à la création d'un objet architectural. Mais par ailleurs P. Boudon (1994) met en garde contre la réduction de la conception à une chaîne de prise de décisions et écrit qu'il ne faut pas confondre « décision » avec « conception ».

La définition *Process of making in the space of the Design World*, donnée par D. Schön (1988, p.182), évoque des figurations d'objets de référence facilement manipulables et associables, qui composent l'espace complexe de la conception architecturale et auxquels l'architecte a recours pendant la phase de conception.

En gardant en vue ces différentes théories relatives au processus de conception en architecture, nous allons essayer à présent de dégager la direction de la pensée théorique actuelle.

### 2.2. Orientations de la pensée théorique

Comme l'écrivait Chr. Kühn en 1993, nous assistons ces dernières années au niveau des travaux en cognition qui étudient la conception architecturale, à un *shift from rule-based to case-based approaches* (p.1). Ceci veut dire qu'à la place d'un processus de

conception débutant avec une solution envisagée assez générale, et consistant en la réduction de cette solution initiale à l'aide de règles, de façon à faire converger vers une solution finale, la conception est actuellement plutôt comprise comme un processus créatif basé sur un jeu d'analogies et de cas précédents, organisés de manière à engendrer la solution finale.

Parmi les exemples des théories à la base de *cas précédents* sont : le *pattern language* d'un pionnier en la matière, C. Alexander (1977) et les *éléments* de P. von Meiss (1990). Les deux auteurs font appel à des éléments et des caractéristiques « primaires », pris plutôt séparément et non pas mis dans un contexte conceptuel. Pour nous, il est difficile d'imaginer la réalisation de l'idée d'une librairie d'objets de référence pour assister la conception en utilisant une description géométrique des éléments et des objets séparés et non-approchés dans leur complexité.

Toujours basée sur les cas précédents, la théorie proposée par Chr. Kühn (1993) considère la sémantique des structures comme primordiale. Pour faciliter la CAO il fait appel à des méthodes issues des théories des jeux.

D. Schön (1988), quant à lui, trouve que, pendant leurs activités créatives, les architectes font référence à des objets et des métaphores de différents ordres. Selon lui, le processus créatif pour chaque architecte se déroule dans un « monde » particulier, dans un « espace de conception » (*design world*) impliquant des concepts, des stratégies et des éléments de raisonnement. Le savoir-faire du concepteur est incorporé non pas seulement dans sa façon de faire, mais également dans les objets avec lesquels il construit une figuration de la solution. Ces éléments, *things to think with*, ont une sémantique très riche. Schön utilise le terme « objets-type » pour signifier ces figurations qui représentent à la fois, des cas précédents, l'objet à concevoir, en émergence; des métaphores et des règles de composition. L'auteur écrit que *Designers construct their design worlds not only through the shaping of materials, but through interlocking processes of perception, cognition and notation.* (Schön, 1988, p.183)

En somme donc, la conception d'un édifice peut se faire sur la base de « choses » et d'événements déjà vus ou vécus. Ce sont les liaisons entre ceux-là ainsi que les métaphores et les analogies qui participent à la création. Avec cette compréhension de la phase initiale du design, il est à présent possible d'esquisser les caractéristiques de cet « espace de conception » dans lequel l'architecte exerce ses activités de création et les « objets-type » qu'il y recherche.

### 2.3. Caractéristiques de « l'espace de conception »

Selon notre compréhension de l'espace de conception, il y a au moins trois éléments indissociables qui nous intéressent (*Figure 1*):

- Les figurations d'objets-type (présentées par l'ovale);
- La recherche par analogies : façon de rechercher et de trouver l'objet désiré parmi les objets-figurés et façon d'enrichir l'espace de conception avec de nouvelles figurations venant de l'extérieur du domaine de l'objet à concevoir (présentée dans la figure par la flèche); et
- La génération par règles : façon de décrire les objets-type pour qu'ils puissent servir comme référent ou comme base de création d'un objet-cible (présentée dans la figure par une structure de parallélépipèdes).

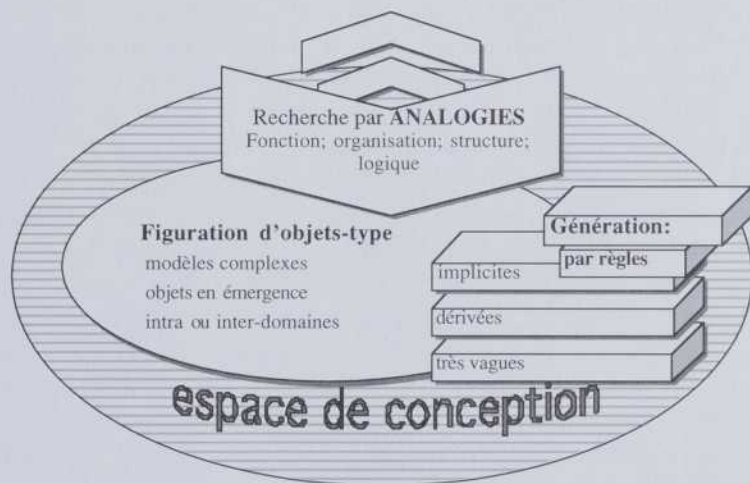


Figure 1. Espace de conception architecturale

Les figurations en question (*fig.1*) représentent des objets-type<sup>1</sup>. Elles sont dynamiques, manipulables et à la fin du processus de conception, peuvent se transformer

<sup>1</sup> Il est possible que la notion de type, utilisée dans le cadre de cette recherche, ne coïncide pas entièrement avec la signification la plus générale attribuée à ce terme. Le sens entendu ici est particulier et ne désigne ni le type fonctionnel du bâtiment, ni la forme... Nous discuterons d'avantage des objets-type plus loin dans cet article.

en figurations de l'objet posé comme finalité au début de ce processus. Pendant ce processus de conception, on peut apercevoir l'objet-cible, en émergence et en transformation. Ph. Deshayes (1997) écrit que : « Les objets en conception (en cours ou en processus de conception) ne sont pas encore des objets ! Ils sont des entités destinées sans doute à devenir des objets mais ils n'ont pas encore cette identité. Et ils ne sont pas non plus, pour autant, des entités inexistantes. Quelque chose, quelque part, est à la fois en émergence et en spécification » (p.53).

Stratégiquement, toute personne peut faire appel à l'analogie dès les premiers moments de la définition d'une nouvelle tâche ou de la réalisation d'une finalité. Les analogies, que l'architecte considère pendant la phase initiale de la conception, ont rapport au fonctionnement, à la structure ou à la logique générale de l'objet à concevoir (Bonnardel et Rech, 1997); « Le concepteur transfère le principe de fonctionnement d'un objet connu (objet-source ou solution source) pour élaborer le principe de fonctionnement de l'objet à concevoir (objet-cible ou solution-cible) ». Même si les objets-référence recherchés sont figurés comme des formes dans l'espace, avec leur géométrie et leurs caractéristiques visuelles, le critère de recherche n'est pas formel mais sémantique. La recherche par analogie dépasse largement le domaine dans lequel se situe la finalité envisagée. Il n'est pas nécessaire que les objets-référence viennent du même domaine, ni même du monde de design en général. Il suffit de trouver une ligne sémantique commune, pour mettre une forme de la nature dans l'espace de conception ayant pour but par exemple la définition d'un édifice comme un théâtre.

En fonction de la phase de créativité considérée, un concepteur a tendance à évoquer soit plus de références intra-domaines (provenant du même domaine de connaissances ou d'utilité), soit plus de références inter-domaines (qui ont seulement quelques caractéristiques en commun avec l'objet en conception) (Bonnardel et Rech, 1997). Les références intra-domaines au tout début de la conception d'un objet de design peuvent plus facilement devenir une fixation. De ce fait, il est important de ne pas proposer aux architectes des « bibliothèques », composées uniquement de cas précédents qui se rapprochent beaucoup de l'objectif visé, mais aussi des objets-type parmi lesquels ils peuvent trouver seulement quelques liens sémantiques.

Les règles de composition ou de construction et les lois logiques sont présentes à chaque phase de l'élaboration d'un projet d'architecture. Cependant, pour un architecte, elles se trouvent plus dans la genèse des formes et des compositions que dans des formules mathématiques et causales. Très souvent, un architecte peut donner un exemple de l'application d'une règle, mais il ne peut pas la formuler explicitement (Schön, 1988). Les lois et le savoir-faire, dont les architectes se servent, sont assez souvent très vagues – des constructions dérivées d'autres objets-type.

En somme, après ces quelques constatations, il est possible de comprendre l'organisation de l'espace de conception architecturale articulée autour des notions suivantes :

- des figurations transformables et combinables d'objets-type,
- un savoir-faire, nécessaire pour la construction de ces figurations, incluses dans leur description;
- des caractéristiques et des liens sémantiques qui servent à l'établissement d'analogies ( mots clés ou *patterns* identifiables)

Dans le cadre du présent travail, nous proposons une description des objets-type, qui portera en elle-même, et le savoir-faire associé aux objets, et les liens sémantiques qui invoquent les analogies. Pour arriver à cette fin, nous allons d'abord rechercher les caractéristiques des figurations formées dans l'espace de conception d'un architecte.

### 3. Figurations d'objets-type dans l'espace de conception

#### 3.1 Types de figurations évoquées comme références

N. Bonnardel et M. Rech (1997) trouvent, qu'au tout début du processus de conception d'un objet la présence d'objets de référence inter-domaines est très inspirante et stimule la créativité du concepteur. À titre d'exemple, D. Jansson et S. Smith (1987) montrent que la suggestion de représentations graphiques d'objets susceptibles de répondre aux spécifications énoncées dans la définition d'un problème de conception amène les concepteurs à reproduire de nombreux aspects de ces objets, y compris ceux inappropriés ou incorrects. Selon ces auteurs, « les concepteurs s'attacheraient moins aux caractéristiques de surface de l'objet... et rechercheraient dans des domaines variés des objets connus présentant des principes de fonctionnement en partie communs avec ceux souhaités pour l'objet à concevoir ». Ainsi, et en ayant en vue notre objectif de proposer un assistant inspirant la conception, il nous semble souhaitable de *proposer aux concepteurs des objets d'inspiration inter-domaines dès le début du traitement d'un problème et de mettre en évidence plutôt les propriétés fonctionnelles et sémantiques des objets-type, que leurs caractéristiques visuelles.*

Les caractéristiques structurelles de ces figurations proviennent du fait qu'une partie des réflexions en architecture est basée sur les lois de la logique structurale et fonctionnelle de la construction. Les éléments dans un bâtiment suivent une logique qui est bien claire dans le raisonnement d'un ingénieur ou d'un architecte. Celle-ci est généralement fondée sur des formules de calcul de structures ou sur les caractéristiques de l'usage de l'espace.

Alors, *les figurations en discussion sont chargées aussi du savoir-faire qui a servi à générer ou à produire l'objet.*

### 3.2. Rôle des figurations évoquées dans l'espace de conception

D. Schön (1988) appelle les figurations des cas précédents, pendant le processus de conception architecturale des objets-type. En fonction du rôle de ces objets-type pendant la phase initiale de la conception, il définit quatre classes d'objets-type: fonctionnels, types-références, gestalts spatiaux et archétypes d'expérience (*experiential archetypes*). Selon lui, chacun de ces types joue un rôle différent et spécifique pendant le processus de conception. Le type considéré ici ne réfère ni à la fonction, ni à la forme d'un bâtiment. Il regroupe les objets figurés selon leur rôle dans l'espace de conception architecturale. Il possède à la fois la généralité fonctionnelle, structurelle et logique d'un objet, mais peut aussi présenter sa spécificité visuelle. Il est possible de nommer cette notion de type « dynamique ». Ces types subissent des transformations pendant la conception. Ils passent à des états plus généraux ou plus spécifiques, selon le niveau de conception où ils se trouvent (Deshayes, 88).

D'après nous, cette classification peut servir comme base d'une organisation des figurations de cas précédents faisant partie d'un assistant à la CAO.

### 3.3. Caractéristiques désirées pour un assistant à la CAO

Sur la base des réflexions déjà exposées relatives aux des figurations d'objets-type que les architectes manipulent dans leur « espace de conception », nous sommes en mesure de reconnaître les principales caractéristiques pour un assistant intelligent et stimulant pour la créativité pendant la phase initiale de la conception architecturale.

Nous avons déjà établi que les figurations dans l'espace de conception se transforment dans l'espace et dans le temps. Ceci implique alors qu'un tel assistant peut devoir présenter une figuration d'objets-type, leur organisation et leurs transformations. Ceci est possible en considérant un modèle de système complexe (Le Moigne, 1990).

La sémantique et le savoir-faire, incorporés dans les objets de référence, sont les caractéristiques à l'aide desquelles le concepteur arrive à établir des analogies. La logique structurelle et fonctionnelle est considérée comme une partie indépendante de la figuration d'un objet architectural. Ceci cause une simplification des modèles. Comme cette recherche vise à proposer une figuration des objets-type dans l'espace de conception « qui servira à un acteur d'un processus de conception afin qu'il se construise une image mentale d'une solution architecturale dans le but de la transformer » (Tidafi,

1996), les références recherchées et la solution « en émergence » figurée doivent être tridimensionnelles et structurées dans leur définition.

Les objets de référence figurés doivent être à la fois visuels et ne pas devenir une mauvaise fixation dès le début de la création de l'objet-cible. Ils doivent proposer aussi des références inter-domaines.

Il est souhaitable que l'assistant recherché propose une hiérarchie dynamique (non-fixe) d'objets-type, correspondante aux différentes classes de types, évoqués pendant la conception. Cependant, il doit également laisser le choix au concepteur. Il est aussi recommandé que l'organisation du modèle puisse assurer des figurations en fonction de finalités différentes des acteurs. Au niveau formel, un des avantages sera la possibilité de donner au concepteur un moyen de « saisir » des formes émergentes et de les définir explicitement.

Avec les caractéristiques d'un assistant à la conception architecturale ainsi dégagées nous chercherons à présent les moyens à le rendre disponible aux architectes et nous examinerons les possibilités qu'il pourrait offrir à la CAO.

#### **4. Limitations des outils de CAO disponibles**

Comme « la conception et la figuration ne peuvent pas être dissociées » (Tidafi, 1996) et comme notre intérêt porte sur la CAO, il devient nécessaire d'aborder la question des méthodes de conception sans les détacher des moyens de communication mis à contribution en architecture. Les agences d'architecture sont de plus en plus informatisées, et n'ont cependant presque rien changé quant à la façon de représenter un projet à l'aide des outils informatiques, qui date de l'époque de la découverte de la perspective pendant la Renaissance italienne. En examinant les caractéristiques, définies comme nécessaires pour les modèles d'objets-type dans l'espace de conception, il devient clair que les logiciels de CAO/DAO disponibles, ne possèdent ni la puissance, ni la flexibilité nécessaires pour assister la création d'un objet d'architecture.

##### **4.1. Limitations des outils de CAO par rapport aux caractéristiques du modèle recherché**

Comme nous l'avons déjà mentionné, W. Mitchell (1991) souligne que le plus difficile est d'atteindre une intégrité du modèle informatique, pendant les phases initiales de la conception d'un objet. Les outils informatiques utilisés présentement ne se prêtent pas à ça. Des limitations au niveau de la géométrie, de la topologie ou de la sémantique empêchent la figuration d'objets en transformation et discriminent l'organisation entre les différents éléments, pour laisser place à une possibilité de visualisation uniquement. Le

savoir-faire derrière les objets conçus est complètement perdu et remplacé par une représentation d'un résultat final et figé.

Il y a présentement beaucoup de travaux de recherche en cours qui visent un changement de paradigme dans le domaine de la CAO: il s'agit de faire *contribuer* l'informatique au niveau du processus de conception et non pas seulement faciliter le dessin ou la représentation finale d'un projet. Avec l'intérêt récent pour le raisonnement par analogie, plusieurs auteurs proposent des méthodologies pour intégrer des cas précédents ou des règles de génération aux outils informatiques, destinés à assister la conception architecturale.

#### 4.2. La représentation informatique de « cas précédents »

Deux approches s'opposent ici, toujours en ayant comme base la notion de cas précédents, utilisés comme référence pendant la conception. La première propose la génération automatique d'objets par l'application d'opérateurs de transformation sur des primitifs géométriques. La seconde considère la définition de bases de données visuelles « évocatrices ».

Quand les chercheurs représentent des objets architecturaux avec l'objectif de créer une base de « cas précédents » ou de primitives de base pour assister le design architectural, ils engagent inévitablement une classification des objets à représenter et ensuite définissent les opérations applicables à chaque classe d'objets. Dans ce qui suit, nous discutons les travaux de certains auteurs qui réalisent des recherches dans ce domaine. L'ordre de leur présentation n'est pas tellement dicté par la chronologie que par la place de leur théories dans l'évolution de la pensée vers une représentation sémantique des figurations en architecture.

Une des façons de décrire les cas précédents et les « styles » d'architecture est par des « grammaires formelles ». Cette approche concerne surtout le niveau formel des objets: des symboles de formes sont initialisés et ensuite transformés par des opérateurs géométriques syntactiques définis de manière à permettre la génération d'objets du même « style » (Stiny, 1980). Ainsi, en 1990, G. Stiny identifie une des problématiques des approches automatisées: les formes émergentes, qui sont des configurations non-explicites mais qui peuvent enlever une fixation déjà créée pendant la conception, peuvent être développées dans les étapes suivantes de la conception si elles peuvent être « explicitées » dans la figuration. La même année, U. Flemming, classe les objets dans l'espace de conception, toujours sur la base des grammaires formelles, dans des « classes générales syntactiques en architecture ». Ensuite, W. Mitchell (1990), définit des *design classes* et des opérations appliquées sur celles-ci pour formaliser la diversité architecturale. Tous ces concepts sont essentiellement basés sur la morphologie des

objets inscrits dans l'espace de conception. Les opérateurs de transformation sont formels aussi, ce qui les rend plutôt appropriés à une génération des *patterns* visuels.

J. Gero (1987) ajoute à la morphologie d'autres types de caractéristiques, pour former ce qu'il appelle le *design prototype*. Il intègre trois types de descriptions pour une classe d'objets en design: fonctionnelle, structurelle et *behavioural*, avec des liens entre elles. Avec le même objectif en vue, R. Coyne (1990) propose la création des groupes *clusters*, selon des mots clés définis à l'avance. Il utilise comme base de départ des images bitmap, ce qui rend presque impossible la tâche de l'automatisation de la classification des exemples. Il essaie d'identifier les règles selon lesquelles les cas précédents peuvent être classifiés et en arrive à deux : (1) par « l'affinité » des exemples, jugée sur la base de caractéristiques explicites et (2) par analyse conceptuelle – la présence de plusieurs caractéristiques identiques, toujours à la base de caractéristiques explicites. Ces approches d'association et de connexion entre les caractéristiques des objets de la même classe sont similaires aux approches adoptées par B. Dupart et M. Poulin (1995) pour l'analyse de façades de bâtiments historiques à Lyon. Ces dernières trouvent principalement deux types de liens entre les éléments architecturaux explorés : (1) des relations que les caractéristiques engagent entre les objets; et (2) des relations que les objets engagent entre les caractérisations ou attributs. Les méthodes que les auteurs envisagent pour le traitement de ces liens sont : la méthode statistique (classifications ou calculs de distances) pour les liens du premier type mentionné; et une analyse des relations systémiques entre les caractérisations dans le second cas.

Même après l'ajout de caractéristiques non géométriques aux objets de base et aux opérateurs de syntaxe et de regroupement, il nous paraît que les règles utilisées et les formes ainsi générées, demeurent à un niveau formel et limitent la créativité.

En 1991, W. Mitchell introduit la notion de « grammaire fonctionnelle » indiquant ainsi que les objets finaux sont les résultats des actions et des processus de production. Alors, la grammaire de leur description doit être plutôt fonctionnelle que formelle. Ainsi l'objet-résultat comprend aussi le savoir-faire qui l'a engendré. Notre méthode de description est basée sur la même compréhension.

Dans l'approche « évoquative », proposée par M. Léglise (1999), l'attention se porte davantage sur le concepteur que l'on situe dans un dispositif de coopération avec la machine et les réseaux. J.-P. Chupin et M. Léglise (1997), écrivent que le plus grand risque de la surconsommation visuelle réside dans la production passive d'effets de surface au détriment d'un travail sur les significations profondes. Ils proposent alors à leurs étudiants des procédures « actives » sur le matériel visuel, avec lesquelles il est possible de « pénétrer » les surfaces du visuel et évoquer des analogies avec l'objet à concevoir. Chaque concepteur peut créer une base de ses propres analogies et réflexions, utilisable par lui-même seulement. M. Léglise espère que les structures des bases ainsi

montées, vont évoluer pour permettre une nouvelle génération de dispositifs logiciels qui autorise la manipulation de connaissances, et non plus seulement d'informations.

De son côté, D. Schön (1983) donne une définition du processus de prise de décisions pendant la conception architecturale comme étant une projection de *métaphores* déjà connues, sur des nouvelles situations de conception. L'idée de la métaphore implique l'analogie et la précédente, à la fois. Plus tard, toujours sur cette base, l'auteur explore différentes façons d'analyser, de gérer et de classer les cas précédents. En 1994, il écrit que les schèmes analogiques participent de façon cruciale au *dialogue réflexif* que les concepteurs entretiennent avec une situation donnée. Alors, bien plus que de se contenter de nommer ou de montrer des cas précédents, la recherche entreprise pour se monter un répertoire en architecture peut aller jusqu'à analyser la réflexion qui a permis à un architecte de poser le problème, la solution qu'il a trouvée et les domaines d'où il a tiré son vocabulaire architectural. Comme une partie importante du « monde conceptuel » de l'architecte est constituée d'images mentales auxquelles il a recours pendant la phase initiale de son projet, ces images doivent porter aussi sur la sémantique et la logique de leur propre création. D'après D. Schön, ce sont des figurations d'objets-type en architecture qui portent les caractéristiques typologiques les plus significatives de choses déjà vues ou vécues, autrement dit de « cas précédents », de « patterns spatiaux », de systèmes de construction ou de fonctionnalité de l'espace.

Les modèles d'objets-type analysés par nous plus loin dans cet article, pourraient être utilisés par plusieurs, parce qu'ils sont basés sur l'analogie constructive qui est objective, et non pas sur la perception qui demeure subjective. Ils permettent la compréhension et la manipulation de connaissances, car ils sont générés par des règles de savoir-faire (lois de composition géométrique, de fonctionnement, de construction).

## 5. Méthodologie

L'objectif de notre recherche est de proposer une méthodologie de modélisation des objets qui sont présents dans l'espace de conception, dans le but de créer un assistant visuel et fonctionnel pendant la conception architecturale.

### 5.1. L'approche adoptée

Le problème avec les bibliothèques d'objets ou d'éléments, provient du nombre incommensurable de cas précédents dont un architecte peut se servir. L'approche non-causale adoptée par nous, se base sur la théorie de la modélisation de systèmes complexes. Elle permet les transformations des formes dans l'espace et dans le temps, ce

qui caractérise l'organisation dynamique d'un modèle (Le Moigne, 1990). La modélisation d'actions est proposée, comme moyen permettant la définition d'un modèle, produisant des figurations, susceptibles de répondre aux exigences variées des objets-type dans l'espace de conception, déjà discutées plus haut. Nous ferons la validation de cette approche par une étude de cas, choisis d'une façon permettant la représentation de classes différentes d'objets-type dans l'espace de conception en architecture.

Nous proposons de modéliser des objets-type de l'espace de conception à la base de la typologie de chaque classe de figurations, telles que définies par D. Schön et qu'il considère significatives pendant la conception d'un objet d'architecture, à savoir les classes : fonctionnelle, de type-références, de *gestalt spatial* et d'*archétypes d'expérience*. Cette classification des objets-type nous permettra de gérer plus facilement les typologies à modéliser. Voyons à présent comment extraire la typologie de chacune des classes en les discutant ci-après.

Comme le constate J. La Marche (1994), *the idea of type changed focus historically from visual to functional, from optical to phenomenal*. De ce fait, nous adopterons plutôt une typologie de nature fonctionnelle et constructive.

Le type fonctionnel est le plus utilisé pour les classifications en architecture. En général, l'homme reconnaît les objets (les bâtiments, inclusivement) par leur vocabulaire formel, mais les classifie par fonction. Quand on voit un canari ou une autruche, par exemple, on les classifie comme oiseaux, mais le mot oiseau peut plutôt évoquer l'image d'un rouge-gorge. De la même façon, l'image mentale d'une catégorie de bâtiments peut porter la signification pour une grande variété de bâtiments de même type fonctionnel (Robertson, 1994). C'est le type de base qui est le plus puissant et qui porte la signification la plus générale et la plus riche. Pour nous, c'est le type de figuration le plus riche sémantiquement et qui comprend le savoir-faire le plus multidisciplinaire. Les règles de sa modélisation sont à la fois fonctionnelles et basées sur des contraintes. C'est le type de figuration qui peut comprendre tous les autres types comme sous-types.

Toujours selon D. Schön, le type-référence représente une figuration plus spécifique. En architecture, ça peut être un bâtiment (ou un élément) spécifique ou un groupe de bâtiments particuliers qui représentent une idée. (le jardin japonais, par exemple). La typologie à modéliser ici peut être le résultat d'un ajout de règles formelles au modèle du type fonctionnel; ou de l'ajout d'une sémantique fonctionnelle au modèle *gestalt-spatial*.

Au sein de l'espace de conception, le *gestalt spatial* est la figuration d'une image bien familière qui sert comme référent, comme repère de réflexion pendant la conception architecturale. Il est aussi l'élément qui devient très souvent la « fixation » à partir de laquelle on continue de travailler. Selon l'approche cognitive, le *gestaltisme* est la perception des objets toujours dans le contexte de leur environnement et voisinant d'autres objets avec lesquels des relations sont entretenues. La typologie à modéliser ici

est d'un ordre plus géométrique et formel. La notion de composition et d'interférence avec l'environnement sera assurée par la complexité du modèle.

Les archétypes expérimentés sont souvent exprimés par métaphores. Ils se basent sur des expériences et des émotions vécues, et d'après D. Schön, permettent à l'architecte de se mettre en *felt-path mode*, par rapport à l'espace de son objet de design. Nous comprenons les archétypes comme porteurs soit d'une idée sémantique, d'une vision formelle ou encore d'un type de relation entre les objets. La typologie à modéliser dans ce cas peut être d'une nature variée. Parmi les moyens pouvant servir à l'exprimer, nous pouvons considérer une fonction; un mot clé; un pattern formel, etc.

En somme, les types à modéliser dans le but de rendre disponible leurs figurations pendant la CAO, réunissent des objets-type selon les règles de leur composition spatiale, les lois physiques et techniques qui assurent leur bon fonctionnement et/ou des façons de bâtir qui sont à la base de leur définition. De cette façon, le modèle pourra préserver la nature dynamique des objets-type considérés. Si des paramètres de la définition d'actions servant à la modélisation sont changés, le résultat final pourra changer aussi.

## 5.2. La typologie

La définition courante de la typologie est « l'étude des traits caractéristiques dans un ensemble de données, en vue d'y déterminer des types, des systèmes » (Petit Robert). Dans le contexte de notre recherche, la typologie consistera en : des règles géométriques, des lois de composition, des savoir-faire de l'art de bâtir, des normes de fonctionnement, des normes du design urbain, et d'autres traits caractéristiques, jugées significatives pour un objet-type donné.

## 5.3. Outils de modélisation

L'idée est de rendre disponibles pendant la phase initiale de la conception non pas des « cas précédents » figés, ni même seulement paramétrés, mais les règles de leur composition ou construction, exprimées au travers d'actions paramétrées. De cette façon, les résultats finaux possibles pourront être beaucoup plus variés et la complexité de l'objet architectural est incarnée dans son modèle. Contrairement aux *grammaires formelles*, la principale composante de notre modèle est l'action génératrice de l'objet-type, soit-elle formelle, fonctionnelle ou normative. Ces actions sont traduites par des fonctions en langage de programmation fonctionnelle. Les objets sur lesquels peut s'appliquer chaque fonction peuvent varier. Ainsi, une même fonction pourrait s'appliquer aussi bien sur une sphère (pour générer un objet décoratif, par exemple), que sur un espace intérieur. Il suffira que le concepteur trouve des liens sémantiques entre les

deux ou qu'il veuille incorporer le même « bout » de savoir-faire dans les deux situations. La richesse et la créativité peuvent être le résultat des variations des paramètres de la fonction-génératrice ou le résultat d'une nouvelle organisation entre les objets-type.

La méthode de description par définitions d'actions au travers d'écriture de fonctions permet une façon de regrouper et d'établir des requêtes de types par des caractéristiques déjà reconnues, mais aussi par des caractéristiques dérivées (s'il y a suffisamment d'information de base pour cela). Ceci permettra la création de liens non-existants au début, qu'on peut appeler aussi émergents.

#### **5.4. Organisation et relations entre des objets**

Les objets-types que nous aurons à modéliser pour les buts d'une aide à la conception architecturale peuvent être en relations de composition ou d'interférence avec d'autres objets-types de la même sorte, peuvent être compris comme élément de composition dans un objet-type d'une classe plus générale et peuvent aussi englober un ou plusieurs objets-type de sortes plus spécifiques. Ces relations doivent être prises en compte et intégrées à une organisation des objets. Les relations d'égalité ou de subordonance doivent être recherchées et modélisées. De cette façon, l'organisation et la complexité de l'objet architectural seront préservées dans le modèle qui servira à la production de figurations. Les différentes interactions entre ces types peuvent impliquer des changements complexes dans le résultat final. Comme une des applications possibles de cette approche, nous considérons l'étude approfondie des objets-types compris dans un bâtiment patrimonial dont les résultats vont servir à aider la fondation de la conservation de ce bâtiment sans entraîner la perte de valeurs historiques.

En informatique, cette organisation peut être modélisée par une description fonctionnelle exprimant des actions et des règles. Par exemple, des liens sémantiques imbriqués peuvent être traduits par une fonction qui attend une autre fonction comme argument. En tout temps, l'interaction de l'architecte avec le modèle est assurée par la possibilité de modifier des règles ou leurs paramètres.

L'approche de description informatique, géométrique et fonctionnelle est une façon de garder les traces du savoir-faire de l'objet; de visualiser sa figuration transformable et de générer de nouveaux incidents, assis sur des règles de base, à partir d'un seul modèle.

## 6. Proposition d'étude de développement pour validation de la méthodologie proposée

Pour assurer une validité interne et externe à notre méthodologie, nous modéliserons des objets-type de chaque sorte en utilisant le même algorithme d'étude pour chacun. La démarche sera structurée autour de quatre étapes :

1. À partir de l'objet réel (ou de sa représentation) reconnaître, définir et décrire les règles les plus significatives caractérisant sa typologie.
2. « Traduire » cette typologie et le « savoir-faire » permettant de la construire, pour les buts de la CAO.
3. Générer d'autres instances de la même typologie à partir de la traduction informatique réalisée.
4. Vérifier si les résultats obtenus portent toujours la même signification et le même « message » (esthétique, constructif ou fonctionnel) que le cas de départ.

Pour ce faire, nous prendrons des objets caractérisables par rapport aux types reconnus. Dans cet article nous présentons quelques idées d'objets à modéliser:

Un motif décoratif (la mosaïque dans l'espace centrale d'une maison art déco sur la côte basque) a été choisi comme représentant du type *gestalt-spatial* à cause de l'impression d'harmonie qu'il évoque. Dans ce cas, les règles de composition sont extraites à partir des photos et des analogies. En ayant en considération les possibilités artisanales de l'époque de la construction, le processus de traçage de la mosaïque au sol est reconstitué. La base géométrique de cette composition est la spirale logarithmique. C'est aussi la loi de croissance qui est à l'origine de plusieurs formes naturelles. D'après nous, c'est surtout elle qui crée l'esthétique agréable de cet objet et qui permet de le classer comme un type *gestalt spatial*. Cette hypothèse sera validée par la génération d'autres objets du même type, à la base de la fonction paramétrée.

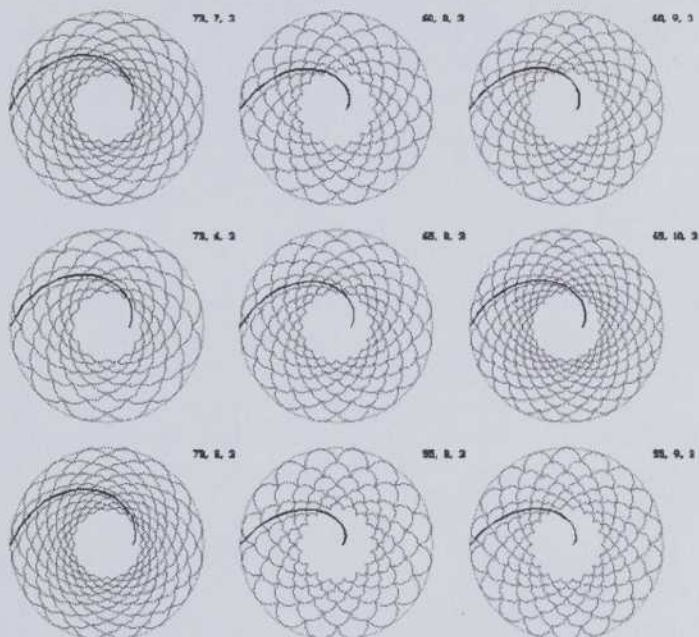


Figure 2. Génération de nouveaux objets-types à la base du même savoir-faire

Un atrium est proposé comme cas d'étude pour un type-référence. L'analyse géométrique et les lois de construction de l'atrium romain étant déjà formulées par Vitruve, nous nous baserons sur les devis disponibles. L'atrium du classicisme a certaines caractéristiques et proportions qui diffèrent de celles de Vitruve. Alors, le modèle de l'atrium pourra avoir comme instanciations l'atrium de Vitruve et celui du classicisme.

La modélisation d'un type fonctionnel est proposée, dans le but d'explorer les transformations, impliquées par un changement d'usage (et alors, du type fonctionnel) d'un bâtiment historique. Un modèle d'une partie de la typologie et des entre les objets-type englobés est en développement.

## 7. Discussion et conclusion

Dans le cadre de cet article nous proposons une méthodologie pour la description informatique des *objets-type* participant dans le processus de conception en architecture, afin de les rendre disponibles aux concepteurs pendant la phase initiale du design d'un objet d'architecture. Un des avantages de l'approche proposée est sa capacité de sauvegarder et de transmettre un savoir-faire. Elle donne aussi la possibilité de générer une variété de nouveaux objets sur la base de ce savoir-faire. Le caractère fonctionnel de la programmation considérée autorise l'organisation des objets modélisés dans des structures complexes qui peuvent produire des figurations variées. Le caractère visuel et 3-dimensionnel des figurations possibles, jumelé à la description par actions, répondent à la façon dont les architectes forment leurs images mentales et aussi à la logique selon laquelle ils cherchent des analogies. Une « librairie de référence » créée de cette façon peut être à la fois individualisée mais aussi partagée et enrichie par plusieurs architectes. Nous voyons l'application de cette approche comme une aide à la formation des architectes, comme un assistant intelligent et évocateur pendant la conception architecturale et comme un support scientifique pour la conservation de bâtiments historiques.

## Références

- Alexander Chr. et al.: 1977, *A Pattern Language : towns, buildings, construction*. New York : Oxford University Press.
- Bonnardel N. et Rech M. : 1997, Les objets – sources d'inspiration dans les activités de conception, *Actes de 01DESIGN'97*, p. 59-71
- Boudon P. et al: 1994, *Enseigner la conception architecturale*, Édition de la Villette, Paris.
- Chupin J.-P. et Léglièse M.: 1997, Un carnet de schémas analogiques pour les phases préliminaires de la conception architecturale
- Coyne R.M. et Yokozawa: 1990, *Computer Assistance in Designing from Precedent, Environment and Planning B : Planning and Design 1996*, vol. 19.
- De Paoli, G.: 1997, La CAO en architecture : modélisation des actions et définition des opérateurs, *Actes de 01DESIGN'97*, p. 191-201
- Deshayes Ph.: 1997, Niveau de conception et unité de conception dans la complexité de l'entre-deux de l'objet en conception, *Actes de 01DESIGN'97*, p. 53-56.
- Dupart B. et Paulin M. : 1995, *Le système de la façade*, Lyon.

- Flemming U. : 1990, Syntactic Structures in Architecture, dans: McCullough M., Mitchell W. and Purcell P. (eds.) *The Electronic Design Studio*, Cambridge, Mass, MIT Press
- Gero J.S. : 1987, Prototypes : a New Schema for Knowledge-based design, *Architectural Computing Unit*, Univ. of Sidney
- Jansson D.G. et Smith, S.M.: 1987, Design Fixation, *Proceedings of the Engineering Design Research Conference*, College of Engineering, University of Massachusetts. Amherst,
- Kühn, Chr. et Herzog M.: 1993, Modelling the Representation of Architectural Design Cases, *Automation in Construction* 2/1993, p. 1-10.
- La Marche J.: 1994, In end out of Type, *Ordering Space*, VNR
- Léglise, M.: 1999, présentation à l'ACFAS'99
- Le Moigne J.-L.: 1990, La modélisation des systèmes complexes. Dunod.
- Mitchell W. : 1990, The Logic of Architecture, Cambridge, MIT Press
- Mitchell W. et McCullough M.: 1991, Digital Design Media, New York, VNR
- Mitchell W.: 1991, Functional Grammar: An Introduction, dans *Proceedings of ACADIA'91 - Reality and Virtual Reality*
- Prost R.: 1992, Conception architecturale: une investigation méthodologique, Paris : L'Harmattan.
- Prost R.: 1993, La conception architecturale confrontée à la turbulence de la pensée contemporaine, dans *Concevoir, Les cahiers de la recherche architecturale*, N.34, Éditions Parenthèses, Marseille.
- Robertson J.: 1994, The Question of Type. Dans : *Ordering Space*, VNR
- Schön D.: 1983, The reflective practitioner, Basic Books.
- Schön D.: 1988, Designing: Rules, types and worlds, *Design studies*, Vol 9 No 3 July 1988
- Stiny G.: 1980, Introduction to Shape and Shape Grammars, *Environment and Planning B*, vol. 8, p. 343-351
- Tidafi T.: 1996, Moyens pour la communication en architecture - Proposition de la modélisation d'actions pour la figuration architecturale, *Thèse de doctorat*, Université de Montréal.
- Von Meiss, P. : 1990, Elements of Architecture – From Form to Place, VNR Int.



## Entre description verbale et modélisation géométrique du design : magie ou réalité?

**Elvire Q. Wang**

*Groupe de recherche en CAO, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal*

**Résumé.** *La modélisation géométrique conventionnelle n'est pas suffisante pour une intégration de la modélisation à un processus de conception. Il y a en effet inconsistance et un manque de mécanisme pour faciliter la modélisation du développement d'une solution. En outre, cela empêche le développement du modèle de la solution lorsqu'un changement du design a lieu, ce qui en fait est inévitable pendant un processus de conception. Basée sur l'analyse d'objets et d'opérateurs utilisés lors de la modélisation, une approche logique de la définition de la composition d'une solution est développée. Une telle définition de la solution détermine la géométrie du modèle. En même temps, elle ouvre une avenue pour la modélisation du développement capable d'accommoder n'importe quel changement pouvant avoir lieu pendant un processus de conception. Avec une telle capacité, elle ouvre la voie à l'articulation des intentions du design d'une part et d'autre part, elle facilite l'exploration de solutions parce qu'elle permet l'examen d'alternatives de la solution. La définition de la composition de la solution logique et la modélisation de cette composition sont présentées dans cet article. Les principes de la modélisation de la solution sont illustrés avec les exemples des compositions d'une cabine de ski.*

### 1. Introduction

La description verbale ou la visualisation graphique sont habituellement employées pour l'évaluation et le développement d'une solution. Cependant, aucune d'elles ne fournit le

moyen pour l'« externalisation » explicite des intentions du design. Cela empêche l'exploration en design par rapport aux deux aspects suivants: a) l'exploration des alternatives ne peut pas être menée avec précision; b) la solution et les alternatives ne peuvent pas être explorée de façon concrète parce que le développement détaillé en design revient cher. Si on constate que la solution sélectionnée n'est pas assez satisfaisante au moment où tous les détails sont développés, il y a des risques de devoir tout recommencer.

Il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes de représentation de la solution permettant d'articuler de façon effective les intentions de conception. Nous proposons que:

- a) L'articulation des intentions de conception soit menée avec précision pour que la solution et les alternatives puissent être facilement explorées;
- b) L'articulation de la solution soit utile pour le développement du processus de conception à des niveaux plus détaillés. Cela signifie que les décisions prises au début du processus peuvent être logiquement exploitées lors de la modélisation de la solution en des versions plus détaillées. Le modèle de la solution en version détaillée peut être facilement généré sur la base de l'information du processus et les spécifications de détail.

La réalisation de la deuxième condition supportera évidemment l'exploration des alternatives de solutions plus efficaces, parce qu'une solution peut être examinée plus concrètement quand des détails sont spécifiés et modélisés. Dans ce qui suit, nous discutons de la description de la solution en essayant d'identifier une méthode d'articulation avec laquelle l'exploration et le développement de solutions peuvent être effectivement supportés. Il est de notre objectif de combler l'écart qui existe entre la conception et la solution par la modélisation.

## **2. Description du produit du design**

Il y a plusieurs façons de décrire les nombreux aspects d'une solution selon l'approche. Notre étude est concentrée sur la complexité des compositions géométriques d'une solution, sur le comment elles peuvent être représentées et comment elles peuvent opérées.

### **2.1. Description géométrique**

Les intentions d'une conception peuvent être décrites verbalement. Elles peuvent également être décrites comme des compositions géométriques. D'un point de vue

purement géométrique, par exemple, une solution peut être vue comme un parallélépipède couvert par deux pans de toits inclinés le long de la longueur en directions est-ouest. Elle peut également être perçue comme en forme d'une boîte tronquée à un des coins allant être utilisée comme entrée principale de l'édifice du côté nord. Quand une solution évolue, ces objets géométriques doivent nécessairement être substitués par d'autres objets qui décrivent l'espace, le mur, etc.

Pour poursuivre notre argumentation, une cabine de ski est sélectionnée à cause de son traitement géométrique unique des éléments de la solution, considérés intéressants, pour explorer la généralité de la modélisation géométrique (Figure 1). Basé sur les extraits de la description, le design de la cabine de ski est principalement composé des deux éléments suivants<sup>1</sup>:

- a) « Fondamentalement, la cabine est une boîte cubique »; et
- b) « Le toit en losange est incorporé diagonalement au-dessus de la cabine »



*Figure 1. Cabine du ski*

<sup>1</sup> Ski Cabin: With its unusual roof...

Architect: Henrik Bull

The rewards of looking out through the tall corner window of this cabin are a dramatic view and a sense of being perched high in a mountain lookout.

Basically, this cabin is a square box placed so that one corner juts from the slope. This corner, all glass, faces out over Squaw Valley near Lake Tahoe. It does face into some winter storms; yet it deflects as the prow of a ship deflects water. The south-facing windows trap enough warmth from the winter sun to roughly compensate for the heat loss they allow during the night.

The diamond-shaped roof folds diagonally over the cabin, creating an illusion that the cabin is not square, and permitting an expansive sleeping loft. Beneath the sleeping loft and well back from the view windows is a snug, cave-like living area. A fireplace is its central point. (Source: Ski and Snow Cabins)

Examinons à présent comment cette composition peut être décrite à l'aide d'un système de modélisation.

## 2.2. Interprétation géométrique

Cette étape est appelée interprétation géométrique et elle peut être traduite en un langage géométrique – objets et opérations géométriques – pour être supportée par un système de modélisation. Étant donné *COMP* une quelconque composition de la solution. Généralement, elle peut être obtenue par l'application des opérations sur les objets. Elle peut être exprimée comme suit:

$$COMP = op (objs)$$

où *op* indique les opérateurs appliqués et *objs* représente les objets géométriques utilisés pour obtenir la forme de la composition.

Dans le cas de la cabine de ski, la solution peut être élaborée en considérant une boîte cubique tronquée diagonalement sur un côté. Dans un système de modélisation, elle peut être traduite d'une des deux façons suivantes:

- a) Une boîte cubique est placée diagonalement et est coupée au-dessus sur deux côtés; ou
- b) Une boîte cubique est placée orthogonalement et coupée diagonalement

Toutes les deux dispositions produisent le même résultat, mais en considérant des mises en place différentes. En termes de modélisation géométrique, la composition de la cabine peut être obtenue en coupant deux coins triangulaires du bloc, si un bloc est utilisé pour décrire la boîte cubique de la cabine. Donc, il y a deux types d'objets et une opération pour modéliser la cabine du ski. Par conséquent,

*Objet: bloc, coin (coin triangulaire)*

*Opération: coupe*

Soit *SKI* une composition de la solution. Nous avons,

$$SKI = coupe (bloc coin)$$

où *coupe* est l'opérateur appliqué et, *bloc* et *coin* sont les objets utilisés.

Une procédure qui détaille la position et le nombre des objets peut être développée pour obtenir la composition désignée. Cependant, la composition obtenue de cette manière peut ou pas être effective pour le développement du processus de conception, particulièrement lorsque un changement important du processus de design a lieu après l'opération de modélisation. Il est nécessaire d'examiner les objets et les opérateurs qui sont habituellement utilisés.

### 3. Définition logique de solution de design

Il est noté que certains objets sont inutiles sauf pour leur contribution à la réalisation d'une opération. Il est nécessaire de développer une alternative plus logique qui puisse être considérée de façon universelle.

#### 3.1. Solution logique

Dans la composition de la cabine de ski, par exemple, l'objet *coin* n'est pas tellement utile et est abandonné après son emploi dans l'opération *coupe*. De plus, de nouveaux types d'objets doivent être introduits si une nouvelle alternative pour la solution est désirée. La sélection des objets est fonction de chaque cas. Différents types d'objets peuvent être employés, qu'ils soient ou non nécessairement reliés à la solution en conception.

Comme exposé, un objet non-logique est impliqué dans la modélisation géométrique d'une solution, particulièrement avec l'opération *coupe*. Étant donné que l'objet employé pour couper est habituellement abandonné après l'opération, théoriquement, il peut donc s'agir de n'importe quel objet jusqu'à ce que la forme coupée soit conforme à celle recherchée. Basé sur cette généralité, dans la suite, l'objet *plan* est utilisé pour accomplir cette fonction. Ainsi, dans la composition de la cabine de ski, la situation peut à présent être articulée comme suit:

- a) La boîte cubique est placée diagonalement et est coupée par deux plans inclinés<sup>2</sup>;
- b) La boîte cubique est placée orthogonalement et est coupée par deux plans inclinés placés diagonalement

En fait, il serait intéressant si cette application du plan puisse être étendue à la définition de tous les éléments impliqués en design comme un mur, un plancher, etc. Par exemple, un mur peut être vu comme un objet coupé par quatre plans (s'il a quatre côtés) qui en fait représentent les objets adjacents. Un étage peut aussi être vu comme un objet coupé par quelques plans de mur (il s'agit de quatre). Lorsque tous les plans sont mis ensemble, nous avons exactement la composition de la solution désirée. Dans la composition de la cabine du ski, nous avons une composition qui comporte sept plans répartis de la manière suivante:

- a) Un plan pour l'étage;
- b) Quatre plans pour les murs; et
- c) Deux plans pour les toits

---

<sup>2</sup> Cette disposition est adoptée pour l'implémentation, dans laquelle les deux plans inclinés peuvent être implémentés par la rotation d'un axial plan-*xz* déplacé autour de l'axe *x* ou *z* dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens contre des aiguilles d'une montre.

La figure suivante illustre la composition de la cabine de ski résultant de l'intersection de sept plans. L'implémentation de la composition de la cabine peut être élaborée<sup>3</sup>.

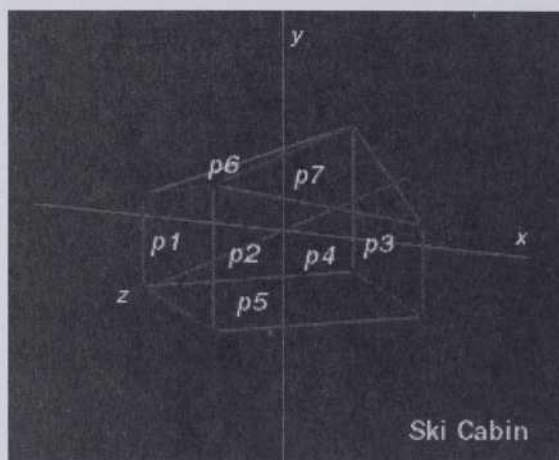


Figure 2. Composition résultante de l'intersection de sept plans: Cabine du ski

### 3.2. Définition du Design

Une grande flexibilité est obtenue dans le développement d'une solution lorsqu'une composition peut facilement être conçue et modélisée. De plus, les différents types d'objets pour une composition, tels un bloc ou un coin, peuvent être éliminés, ce qui donne une consistance aux objets utilisés. La modélisation d'une composition de solution design peut à présent être exprimée comme suit:

$$COMP = proc (P)$$

où *proc* est la procédure appliquée et *P* indique un ensemble de plans avec lesquels une solution est composée.

En termes de définition, une composition de solution peut être exprimée comme suit:

<sup>3</sup> Le plan d'étage peut être placé d'un demi de hauteur sous le plan-xz, alors que deux plans de toit peuvent être obtenus par la rotation d'un plan-xz qui s'élève d'un demi de hauteur de  $\alpha$  degrés dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens contre des aiguilles d'une montre, respectivement. Finalement, les quatre plans de mur peuvent être obtenus par le déplacement de deux plans diagonaux, qui résultent de la rotation d'un plan-xy ou -yz de 45 degrés, d'un demi de largeur et un demi de longueur le long des directions opposées, respectivement.

$$COMP = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$$

où  $n$  est le nombre de plans utilisés pour former la composition.

Alors, la définition de la cabine du ski peut être exprimée comme suit:

$$SKI = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7\}$$

Examinons à présent si une telle façon de faire peut faciliter la modélisation du développement d'une solution en conception.

### 3.3. Modélisation de l'objets du Design

La définition d'une composition est établie logiquement, ce qui fournit non seulement une flexibilité à la solution mais aussi une consistance à la modélisation de la solution. De plus, elle favorise l'établissement d'une connectivité entre les objets pendant la modélisation de la solution. Les plans sont intersectés mutuellement. Par conséquent, une composition peut changer proportionnellement lorsqu'un changement est apporté à une de ses parties.

#### 3.3.1. Connectivité de l'Objets

Lorsqu'un design progresse, le modèle de la solution est construit de préférence avec les objets en 3D. Les objets 3D peuvent être utilisés pour modéliser l'espace, le mur ou une composante comme un clou. Dans ce qui suit les objets de départ de la solution sont développés pour permettre la modélisation d'une variété d'objets.

Il est proposé qu'une relation entre objets puisse être établie de façon inhérente plutôt qu'extérieurement. Il est alors nécessaire d'établir une connectivité entre les objets de la solution afin que la modification de celle-ci puisse être facilitée.

#### 3.3.2. Objets primitifs d'une solution

Les objets primitifs d'une solution sont développés pour maximiser la généralisation d'objets. Ils peuvent être catégorisés en trois classes comme suit:

- 1) L'objet volume, qui possède approximativement les mêmes dimensions dans les trois directions;
- 2) L'objet surface, qui a une étendue surfacique avec une épaisseur;
- 3) L'objet point, qui a une petite section avec une hauteur dans la troisième direction

Tous trois sont des objets volumétriques qui peuvent être développés sur la base de la définition d'une composition.

##### 1. L'objet volume

L'objet de volume peut être utilisé pour décrire les objets d'une solution tels que la disposition de l'espace ou du volume au stade initial. Il est défini par un ensemble de plans, qui peut ou peut ne pas être nécessairement la même que la définition de la composition, dépendant des exigences de la modélisation de la solution. De toutes façons,

la définition de l'objet volume peut être facilement développée, avec ce que l'objet peut être généré.

## 2. L'objet surface

L'objet surface peut être utilisé pour modéliser les objets tels que le mur et l'étage du bâtiment. Il est coupé par un ensemble de plans qui représentent les objets de la solution adjacents. Aussi, la définition de l'objet surface est basée sur la définition de la composition, qui soit en conformité avec les objets. L'objet surface peut être généré avec sa définition et la spécification de l'épaisseur de l'objet. L'épaisseur de l'objet surface est actuellement confinée par deux plans. L'irrégularité de l'objet surface, en forme et en épaisseur, est permise de façon à ce qu'une variété d'objets puissent être modélées.

## 3. L'objet point

L'objet point peut être employé pour décrire les objets de la solution tels qu'un clou ou une colonne. Il est habituellement aligné à un objet surface. Donc, il dépend de la définition de l'objet surface avec lequel il est aligné. Étant donné certaines conditions telles qu'une section rectangulaire ou circulaire, l'objet point peut être généré. Deux plans le coupent à ses extrémités, soient-ils parallèles ou non. Ainsi, l'irrégularité en hauteur est permise. L'objet coupé perpendiculairement à ses extrémités est un cas particulier de cette généralité. L'objet point à section rectangulaire est implémenté et employé pour représenter les composantes du bâtiment de la solution comme le clou utilisé pour une modélisation détaillée du design.

Étant donné qu'il est lié à l'objet surface avec lequel il est aligné, l'objet point peut aussi comme l'objet surface être placé n'importe où dans l'espace. Le même objet peut être utilisé pour modéliser l'objet placé verticalement tel que le clou ou encore l'objet placé horizontalement ou obliquement telles qu'une plaque ou une poutrelle. Il peut être utilisé pour modéliser une variété d'objets de la solution.

## 4. Modélisation des compositions de la solution

Basés sur la définition de la cabine de ski, les modèles de la solution aux différentes phases du processus peuvent être générés.

#### 4.1. Modélisation de la cabine de ski

##### 4.1.1. Modèle conceptuel

Le modèle volumétrique de la cabine de ski peut facilement être généré sur la base de l'input de la composition *SKI*, articulant un ensemble de sept plans (Figure 3).

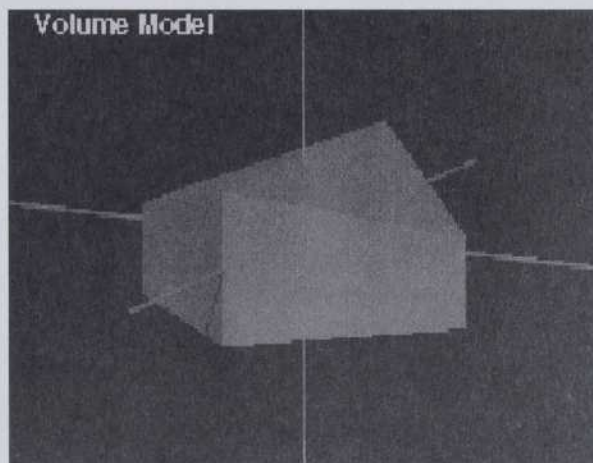


Figure 3. Modèle de volume de la cabine du ski

##### 4.1.2. Modèles détaillés de la solution

Lorsque le processus de conception avance, les modèles détaillés sont générés sur la base de l'input initial de la composition et des informations supplémentaires fournies, relatives aux objets. Une liste d'épaisseurs est fournie pour le modèle de surface de la solution tandis que les informations relatives aux éléments de bois et leurs intervalles sont données pour le modèle détaillé du clou.

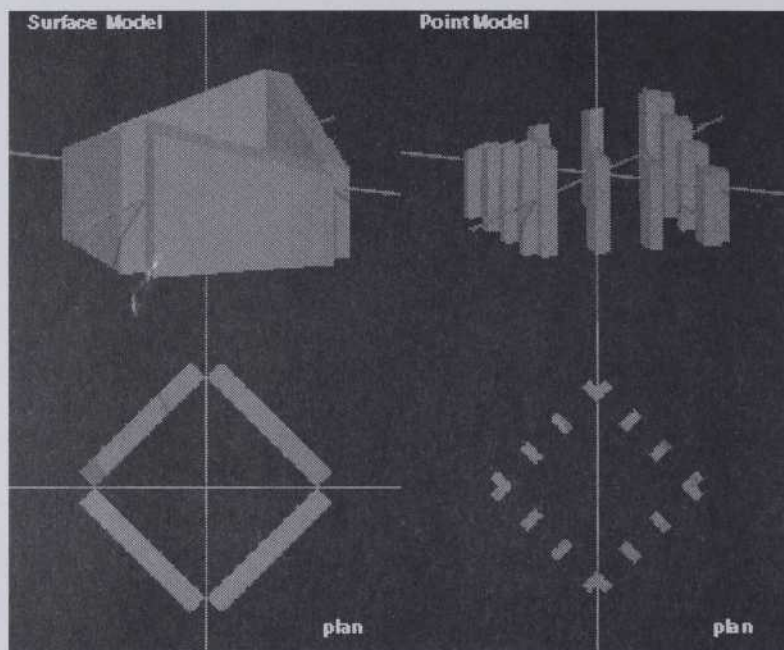


Figure 4. Modèles détaillés de la cabine du ski

## 4.2. Nouvelles solutions

### 4.2.1. Définitions des compositions

Une nouvelle solution peut facilement être conçue, résultante des définitions de la composition initiale. Comme montré dans la figure 5, par exemple, des nouvelles configurations de la solution peuvent être développées. La configuration 1 montre que deux plans de toit peuvent être pivotés en des directions opposées. Deux plans de toit en Configurations 2 et 3 pivotent autour de l'axe  $x$  à la place de l'axe  $z$  comme dans le cas de la Configuration 1 et de la cabine de ski. La Configuration 2 diffère de la 3 par les directions de rotation opposées.

Cela ne signifie pas, cependant, qu'elles sont seulement fonction de la position des sept plans ou des directions du toit. Au contraire il n'y a pas du tout de restriction et une solution complètement différente peut être explorée.

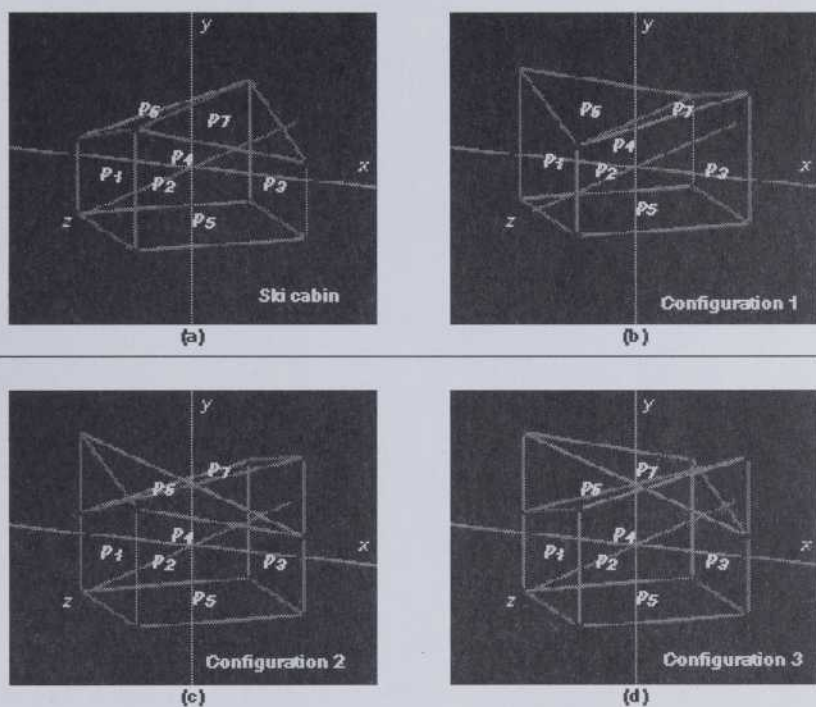


Figure 5. Configurations du design

#### 4.2.2. Modèles de composition

Ensuite, il est montré que le modèle de la solution change en correspondance avec la définition du design donnée. Ceci implique que le changement de la solution peut être facilité par la modélisation du design. Cela s'applique à un changement de la solution réalisée fait au niveau conceptuel comme aux niveaux détaillés. Théoriquement, n'importe quel changement de la solution peut être facilité à n'importe quelle phase de la conception et les modèles de la solution correspondants peuvent être générés.

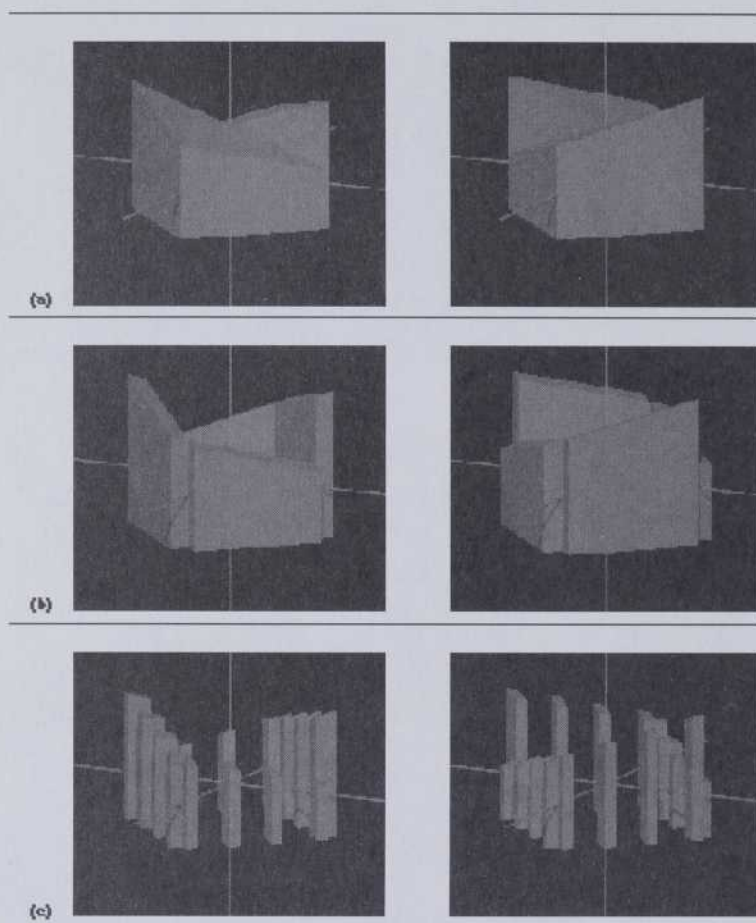


Figure 6. Modèles de Configuration 2 et 3

a) Modèles conceptuels; b) Modèles détaillés; c) Modèles détaillés

## 5. Conclusion

Nous avons affirmé que la modélisation géométrique conventionnelle n'est pas effective pour l'intégration de la modélisation d'une solution pendant un processus de conception. Il y a effectivement inconsistance et un manque de mécanisme pour faciliter la

modélisation du développement d'une solution. De plus, ce constat empêche le développement du modèle de la solution lorsqu'un changement du design a lieu, ce qui est en fait inévitable pendant un processus de conception. Ceci amène à déterminer quelle définition logique d'une solution doit être construite.

Basée sur l'analyse d'objets et d'opérateurs utilisés durant la modélisation d'une solution, une approche logique de la définition de la composition d'une solution est développée. L'objet géométrique – le *plan*, est utilisé pour exprimer la composition d'une solution sans avoir besoin d'introduire d'autres types d'objets. Une telle définition détermine la géométrie de la composition. Elle ouvre une avenue pour la solution qui puisse avoir lieu pendant un processus de conception. La composition de la solution changera en correspondance avec la définition de la solution donnée, parce que les plans qui représentent les objets de la solution sont intersectés mutuellement.

Les objets 3D sont utilisés pour construire les modèles de la solution, pour en faciliter les changements de solution il est important d'établir la connectivité entre les objets de la solution. Les définitions des objets de la solution sont développées sur la base de la définition de la composition du design. Elles sont généralisées dans trois classes d'objets primitifs: l'objet volume, l'objet surface et l'objet point. Elles peuvent être employées pour modéliser les objets de la solution tels que l'espace, le mur et une composante telle que un clou. Dans chaque classe d'objets, l'irrégularité maximale d'objets est recherchée afin qu'une grande variété d'objets de la solution puisse être modélisée. Une telle généralité permet à n'importe quel objet d'être placé n'importe où dans l'espace, ce qui fournit énormément de liberté pour la créativité en design.

Il est montré que le chemin d'une description verbale à une définition de la solution peut être établi. Il facilite l'« externalisation » des intentions en design d'une part, d'autre part, de nouvelles solutions peuvent être explorées sans restriction. Les compositions des solutions peuvent être modelées jusqu'à certains niveaux de détail, supportant l'exploration d'une solution pour une évaluation plus concrète. La modélisation de solutions qui est basée sur une définition du design logique facilite le changement du design à différentes phases de conception. Les objets sont connectés non seulement entre eux, à un même niveau, mais aussi avec des niveaux différents. Ils sont connectés ensemble afin que le changement de la solution puisse être propagé à travers le modèle.

## Références

- Eastman, C.: 1987, Fundamental Problems in the Development of Computer-Based Architectural Design Model, in Y. Kalay (ed.) *Principles of Computer-Aided Design: Computability of Design*, Wiley, New York

- Mitchell, W.: 1990, *The Logic of Architecture: Design, Computation and Cognition*, The MIT Press, Cambridge, MA
- Parisel, C.: 1992, *Essai sur Codification Graphique des Immeubles pour des Fins de Gestion*, Note de Recherche, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal
- Rotge, J.-F.: 1998, *L'Arithmétique des Formes: Une Introduction à la Logique de l'Espace*, Dissertation Doctorale, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal
- Rotge, J.-F.: 1996, Principles to Solid Modeling Design, *Proc. CSG 96: Set-Theoretic Solid Modeling Techniques and Applications*, Information Geometers, Winchester, UK
- Wang, E. Q.: 2000, Construct of Design: A Study for the Application of IT in Building Design, in Fruchter, R. (ed.), *The 8th Intl. Conf. on Computing in Civil and Building Engineering*, Stanford, Aug.14-17, 2000
- Wang, E. Q.: 2000, The Connectivity of Objects as Part of Design Knowledge, *The Artificial Intelligence in Design*, Boston, MA, May 2000
- Wang, E. Q.: 2000, *The Topology and Heterogeneity of Design Representation: Theory and Methods of Design Modeling by Means of 3D Objects and Material Constituent*, Dissertation Doctorale, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal
- Wang, E. Q.: 1999, Empowering the Design Representation: Designing Three-Dimensionally and Topologically, in Osman Ataman and Julio Bermudez (eds.), *Proc. of ACADIA'99: Media and Design Process*, Salt Lake City, Oct. 28-31, 1999
- Wang, E. Q.: 1999, Modeling for Integrated Construction System: IT in AEC 2000 Beyond, Position Paper for Berkeley-Stanford CE&M Workshop, July, 1999
- Wang, E. Q. and Parisel, C.: 1997, Digital Procurement - a Step Towards the Integrated Information System, in Colin H. Davidson and Tarek A. Abdel Meguid (eds.) *Procurement - a Key to Innovation*, CIB W92, May 1997, Montréal
- Wang, E. Q.: 1996, *Classes of Design Objects*, Rapport de Recherche, GRCAO, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal
- Wang, E. Q.: 1995, *Classification of Object Interference*, Rapport de Recherche, GRCAO, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal
- Wang, E. Q.: 1994, *An Approach to Describe Building Design by Means of 3D Objects and Material Constituent*, Rapport de Recherche, GRCAO, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal

## Conception assistée : modélisation et interprétation

**Michel Lèglise**

Laboratoire Li2a, École d'Architecture de Toulouse

**Résumé.** *Les logiciels de conception assistée par ordinateur pour l'architecture sont massivement utilisés aussi bien dans les agences que dans l'enseignement. 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. On propose ici une alternative émergente pour les premières phases de la conception, qui tend à adopter un nouveau point de vue où l'attention se porte davantage sur le concepteur que l'on place dans un dispositif de coopération avec la machine et les réseaux. L'environnement de travail est défini par l'utilisateur, raisonné et changeant en fonction de la tâche effectuée. Cette versatilité est bien adaptée au travail de conception où l'on souhaite généralement que les changements de systèmes de représentation soient possibles, simples et rapides. Ces solutions alternatives tiennent compte aussi du fait que la conception n'est pas un acte isolé, qui n'a lieu que pendant son accomplissement. Concevoir n'est possible que parce que cette activité est précédée d'un nombre important d'opérations cognitives, dont la mémorisation et l'interprétation, qui travaillent le concepteur en permanence et qui lui permettent de concevoir plus tard. Les ordinateurs peuvent nous permettre de stimuler ce travail sur la mémoire et la culture, en gardant pour nous des traces de nos interprétations antérieures. On espère ainsi se diriger vers une nouvelle génération de dispositifs logiciels qui autorise la manipulation de connaissances, et non plus seulement d'informations.*

*« Il y a peu d'événements qui ne laissent au moins une trace écrite. Presque tout, à un moment ou un autre, passe par une feuille de papier, une page de carnet, un feuillet d'agenda ou n'importe quel autre support de fortune [...]. L'espace commence ainsi, avec seulement des mots, des signes tracés sur la feuille blanche ». Georges Perec, Espèces d'espaces.*

## **1. Modèles implicites et maquettes numériques**

Le monde professionnel de l'architecture utilise majoritairement les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) comme outils d'instrumentation du projet. Parallèlement, après une longue méfiance vis-à-vis de l'informatique, beaucoup d'enseignants architectes affirment à présent que ces logiciels de CAO sont indispensables dans l'enseignement de l'architecture. La chose est admise comme allant de soi, souvent en l'absence de débat pédagogique. Et pourtant, même les éditeurs de ces logiciels ne semblent pas revendiquer que leurs produits puissent servir à apprendre à concevoir.

Ces produits de CAO en architecture ne sont évidemment pas des produits d'aide à la conception proprement dite. Ils sont destinés à faciliter la production des pièces écrites, graphiques et textuelles, une fois que la conception est terminée, c'est-à-dire quand le projet est pratiquement définitif. Ils interviennent donc comme outils de production finale (même, si en pratique d'agence ils interviennent bien avant pour des questions de gains de productivité). Ils sont de plus en plus utiles et efficaces pour ces actions bien délimitées.

### **1.1 Des modèles non exprimés**

Or, un programme d'ordinateur peut être considéré comme un modèle formel de description d'une tâche (Hamel, 1994). Dans cet esprit, les logiciels de CAO « contiennent » donc une théorie implicite de la conception, ou du moins de la manière dont elle se mène, théorie ou modèle jamais explicités. Il n'est pas coutume que les éditeurs de logiciels se justifient sur ces modèles, et leur ambition, légitime, est de livrer des produits qui fonctionnent auquel l'utilisateur s'adaptera s'il le souhaite, libre à lui d'abandonner les produits qui ne lui conviennent pas.

La profession, confrontée aux exigences du marché utilise ainsi majoritairement ce qui fonctionne (constatant qu'un logiciel qui ne fonctionne pas est inutilisable, mais oubliant

parfois qu'un logiciel qui fonctionne n'est pas forcément utile), et doit s'adapter à ces modèles implicites.

À défaut de formalisation précise dans le domaine même de l'architecture, on laisse ainsi d'autres champs mieux cernés comme celui de la géométrie ou de la construction s'étendre dans la sphère de l'architecture, remplaçant les points de vue proprement architecturaux sur la conception.

En effet, les logiciels de CAO contiennent des éléments de connaissance technique (géométrie, calculs de structures, calculs thermiques). Certains permettent la construction d'objets pertinents avec leurs propriétés et leurs comportements. Leur efficacité même rend bien difficile une appréciation critique des effets de bord qu'induit leur utilisation intensive. Par exemple, ils nous imposent d'échanger la « géométrie » particulière, certainement obscure et mal définie de l'espace architectural en train de se constituer, contre la géométrie quantitative, analytique, cartésienne, instrumentale, assez facile à implanter sur des ordinateurs.

## 1.2. Des maquettes infiniment exactes

Ces logiciels imposent ainsi la construction directe d'un modèle tridimensionnel, changeant en cela des pratiques centenaires. Cette contrainte (certains diraient cette liberté) peut modifier notre manière de concevoir, et des études devront être menées sur la pertinence de cette approche qui trouve son argument dans une raison économique communément invoquée : toutes les sections (donc aussi les plans et élévations) sont calculables depuis un modèle 3D.

Utiliser trop tôt une maquette 3D fondée sur la géométrie cartésienne et orthonormée comme support de sa représentation, peut faire du coup entrer trop tôt (dans le processus de conception) dans le monde de la mesure et de la précision. Pourtant, parmi les représentations possibles de l'espace, les informaticiens ont du mal à admettre que la meilleure ne soit pas celle qui soit la plus précise possible<sup>1</sup>.

Or les premières phases de la conception nécessitent au contraire flou et imprécision. D'ailleurs, du point de vue de l'enseignement, J. C. Burdese (1989) a montré que l'immersion prématurée dans le précis peut entraîner de véritables blocages dans l'apprentissage de la conception.

Enfin, il y a inadéquation de la géométrie (qui correspond à une approche purement quantitative des entités mais aussi des relations spatiales) à la représentation qualitative de l'espace. Ceci a ouvert la voie à des recherches sur le raisonnement spatial qualitatif en

---

<sup>1</sup> Sans s'interroger bien sûr sur les notions même de précision, de réalisme de la représentation, etc., et sans soupçonner l'existence de quelques peu avouables bricolages que l'on peut rencontrer çà et là dans la représentation géométrique «infiniment exacte» de quelques objets géométriques dans certains logiciels de CAO.

général, dans le champ de l'intelligence artificielle (Goulette, 1997). En effet, les relations enchevêtrées entre pensée architecturale et géométrique sont nombreuses. Et d'ailleurs, les formes discursives et figurales de l'espace nécessitent un ensemble de notions géométriques qui autorisent aussi l'orientation, la localisation et la mesure de ses éléments descriptifs.

Enfin, le problème que soulève l'inadéquation de la géométrie cartésienne pour l'appréhension qualitative de l'espace ne se limite pas aux phases de préconception. La dimension qualitative est toujours présente tout au long de la genèse du projet.

Ainsi, cette citation de 1993 est encore d'actualité : « [...] il reste un travail énorme entre modélisation théorique et conception d'outils, c'est pourquoi il faut se garder de précipiter les articulations avec les pratiques professionnelles, car il existe un réel danger de simplification de la recherche en amont » (Sottinel & al., 1993).

## **2. Représentations descriptives et représentations productives**

La représentation graphique en architecture est, on le sait, un moyen d'anticipation, de communication, de description, de contrôle et de validation durant le processus de conception. De nombreux travaux se sont attachés à étudier le rôle de cette figuration dans la description ou la modélisation du processus (Hamel 1994 ; Lebahar 1983 ; Quintrand 1986).

Une typologie du dessin pour l'architecture, de ses usages, de ses conventions (« crobart », dessins « destinés à explorer le problème », « dessins de clarification », « d'élaboration », « de perlaboration », « d'exécution », etc.) est menée par M. Conan (1989). Le dessin est un outil de conceptualisation, ainsi qu'un outil de « réduction d'incertitude » (Lebahar, 1983).

Certains dessins permettent la manipulation d'objets de toutes natures, même abstraite, de schémas, de tracés régulateurs, de règles de composition, etc... Ils permettent un découpage et une interprétation de la réalité, la figuration d'une intention, et ont un incontestable rôle opératoire, par leurs possibilités de mise en relation et leurs propriétés synthétiques.

Schémas, esquisses, croquis, surcharges graphiques, et toutes les formes d'annotation textuelles sont autant de moyens de faire naître des suggestions et participent à l'émergence d'idées nouvelles et de points de vue heuristiques pendant tout le déroulement du processus de conception (Gero & Damski, 1994). Ces représentations particulières, dont beaucoup ne sont ni codifiées, ni d'ordre géométrique, sont donc productives de sens.

L'existence d'une unique maquette tridimensionnelle, comme champ d'opérations dans les produits commercialisés nous semble ainsi très réductrice. Les auteurs de ces logiciels ont certainement sous-évalué l'intérêt d'autres types de dessins. Nous n'y rencontrons que du dessin géométrique, et uniquement descriptif (y compris dans les images de synthèse finales, calculées). Ce maniement de figures géométriques (Jean & Pousin, 1995), se fait aussi au détriment d'une éventuelle aide à la schématisation sous ses formes figurale et verbale (Goulette & Léglise, 1996 ; Lawson & Ming Loke, 1996).

Si l'on veut aider réellement à concevoir, il faut pouvoir mettre à disposition un ensemble de moyens de dessin et d'écriture, et que ces moyens puissent avoir au moins des fonctions équivalentes à celles qui sont assurées dans des situations « manuelles ». Il faut pouvoir en somme réintroduire le dessin sous toutes ses formes opératoires, pour produire, et non plus simplement pour décrire.

### 3. Systèmes d'écriture et dispositifs d'interprétation

On peut remarquer qu'un appel vers d'autres outils commence à se faire jour dans les communautés de chercheurs et d'architectes. P. Amphoux (1998) s'interroge sur « les effets de la pensée logicielle sur la conception architecturale », dans ses aspects de rationalisation et « d'hyper technicisation », avec des recommandations pour représenter informatiquement les « logiques du flou et de l'indéterminé ». La nécessité d'outils « de mémorisation interactive des expériences architecturales individuelles ou collectives, techniques ou sensibles, écrites, imagées ou sonorisées » est évoquée dans le même rapport.

#### 3.1. De l'utilisateur à l'acteur

Proposons un changement de point de vue, en essayant de définir un dispositif global qui pourrait soutenir l'architecte en phase de préconception, privilégiant la considération du concepteur comme *acteur* de son projet plutôt que comme *utilisateur* assisté par un programme dit de conception.

Un ordinateur y est envisagé avant tout comme un media, comme un moyen «permettant l'expression et la communication de la pensée», et on y fait la distinction entre système et dispositif. Ces dispositifs s'opposent en effet aux systèmes de CAO qui apparaissent comme des instruments d'écriture permettant de présenter le projet, au sens des normes et des conventions en vigueur.

Le dispositif que nous suggérons incite plutôt le concepteur à accumuler des représentations permettant de produire (concevoir réellement), en lui fournissant plusieurs outils de lecture et d'écriture.

Un logiciel de CAO peut d'ailleurs faire partie du dispositif comme un des éléments particuliers d'aide à l'élaboration des pièces finales. N'étant plus le seul programme utilisé, la conception n'étant plus centrée sur la représentation et la structure de données qu'il impose, il ne nous engagera pas dans cette technicisation des procédures, ce fonctionnalisme, cet utilitarisme que son unique usage ne manque pas d'induire.

### 3.2. Changements de points de vue

En effet, la conception ne consiste pas, à partir d'une idée globale, à développer une idée formelle, puis une idée fonctionnelle, pour enfin régler des détails (L glise, 1995). L'idée est imprécise et floue mais incisive, fluctuante mais forte, globale, mais polarisée sur certains points précis. L'objet qui va en émerger ne se dévoile pas de manière linéaire, est précis par endroits, indéfini dans d'autres. La conception embrasse le projet dans sa totalité, en permanence, quelque soit le stade d'avancement, mais il peut se faire que certains détails soient fixés très tôt. Et pourtant, la forme globale peut être partiellement validée par l'examen de tous les détails. La littérature sur ces points est assez abondante, par exemple Ph. Boudon (1994), R. Hamel (1994), B. Lawson (1980), R. Venturi (1966) (la « dure obligation du tout »), F. Sottinel (1993) (« la globalité malgré la fragmentation », « l'indétermination dans la fragmentation », « l'indétermination dans la globalité », la « validation par le tout et les fragments »).

L'œuvre en cours d'élaboration est un tout indécomposable. L'architecte, dans ces phases de conception, doit mobiliser une multiplicité de points de vues : il essaie de régler à la fois des aspects fonctionnels, formels, thermiques, constructifs, etc., privilégiant une vue et une échelle (au sens large du terme)   chaque instant.

Les systèmes de CAO savent assez mal assurer ces changements incessants de points de vues et de systèmes de représentations. Cela tient à deux raisons : d'organisation conceptuelle difficile les systèmes de représentations qui auraient une utilité étant très nombreux et divers, et d'implantation informatique délicate.

### 3.3. Localisation, représentation, réutilisation des connaissances architecturales

Enfin, l'activité de conception s'appuie sur des savoirs et des savoir-faire acquis, et   un instant donné, se fonde sur des opérations cognitives bien antérieures, sur des connaissances, qui ne cessent de travailler chaque architecte à chaque moment de sa carrière.

Ainsi, pour concevoir une œuvre nouvelle, un architecte peut s'appuyer sur des fragments de connaissance qu'il a extraits d'œuvres anciennes, réalisées ou simplement projetées. La conception s'appuie alors sur la mémoire d'une interprétation effectuée en

amont, car l'extraction de connaissances réutilisables peut se faire par un travail d'interprétation (Léglise, 1995 ; 1997).

L'activité principale de la science moderne, la modélisation, a sensiblement occulté l'importance de l'interprétation<sup>2</sup>, dont on peut dire qu'elle est à la fois une activité et son résultat.

Interpréter, c'est « dire quelque chose de quelque chose » (Ricœur, 1965). L'interprétation est l'activité de donner une signification aux signes en général ou aux phénomènes. La restitution de sens se fait d'ailleurs elle-même au moyen de signes.

Dans le cas qui nous occupe, l'extraction de connaissances se fait de manière intuitive, et implique toujours que les œuvres anciennes aient été vues directement ou bien appréhendées à travers des représentations. Mais, de toutes façons, il aura fallu, avant toute possibilité de réutilisation, exécuter une double tâche :

- une opération de lecture et d'interprétation
- une opération de mémorisation (par écriture du résultat de l'interprétation).

La première tâche porte sur la manière dont un concepteur découvre du sens, la deuxième permet de représenter puis d'avoir accès à ce sens, plus tard, quand le besoin s'en fera sentir.

Le Corbusier a, au cours de ses promenades, sélectionné des scènes et des objets, dessiné en prenant des interprétations de l'étendue. Il a créé ainsi un espace signifiant pour lui, qu'il a mémorisé sous forme de croquis souvent annotés textuellement sur ses pages de carnets<sup>3</sup> (Le Corbusier, 1981).

Ces carnets sur lesquels sont représentées des éléments de connaissance architecturale, ont une valeur opératoire en phase de conception.

L'importance des répertoires personnels de référents et de précédents a déjà été mentionnée par ailleurs. Selon Schön (1994) : « ...lorsque des situations concrètes ne se conforment pas aux théories de l'action, qu'elles ne correspondent pas aux phénomènes modèles ou aux techniques de contrôle, elles peuvent quand même *être vues* comme des situations ou des cas familiers, comme des précédents. Une recherche visant à se construire un répertoire sert à accumuler et à décrire des cas exemples qui serviront à réfléchir en cours d'action. [...] Bien plus que nommer ou se contenter de montrer les précédents, la recherche entreprise pour se monter un répertoire en architecture peut aller jusqu'à analyser la réflexion qui a permis à un architecte de poser le problème, la solution qu'il a trouvée et les domaines d'où il a tiré son vocabulaire architectural. »

<sup>2</sup> Même si l'interprétation a ses champs authentifiés, comme la sémiotique ou la psychanalyse.

<sup>3</sup> Rappelons ce que disait Le Corbusier : « Il faut regarder et voir (en distinguant soigneusement entre regarder, qui est simplement noter, recueillir, engranger, et voir qui est déjà comprendre, dégager des rapports) et classer ; ensuite seulement, inventer et créer. »

Ces constitutions de vues particulières d'un concepteur sur l'architecture passée peuvent d'ailleurs se référer, dans leurs parties textuelles au vocabulaire traditionnel de l'architecture, qui est lui aussi réservoir potentiel de connaissances. Ce vocabulaire, particulier et spécifique peut être considéré comme dépositaire historique des modes de pensée. Il permet ainsi d'explorer une partie des connaissances architecturales (Goulette, 1997).

Plus globalement, semblent utiles outre les précédents de bâtiments et le vocabulaire de l'architecture, les règles de composition, les dessins de toutes natures, les éléments empruntés à des disciplines connexes, les discours et manifestes sur l'architecture, etc.

Mais les connaissances utiles pour l'architecture ne résident pas uniquement dans le domaine architectural. Des précédents peuvent référer à des objets ou des opérations cognitives ou pragmatiques connues.

Pour les objets, les œuvres architecturales ne sont pas les seules sources de précédents, et n'importe quel artefact peut en fait être utilisé comme précédent dans un contexte donné<sup>4</sup>.

De plus, ces connaissances peuvent aussi trouver leur origine dans les processus généraux découverts par l'humanité pour préparer, symboliser ou effectuer l'action : voir les *templa* de Pierre Boudon (1992), ou les *schèmes convergents* de D. Raynaud (1998).

Ces procédés (aussi divers que *attacher, décoller, couper, recouvrir...*) sont efficaces, l'histoire de l'humanité l'a montré, et ils sont généraux et applicables à plusieurs classes d'objets ou de domaines de l'activité. Leur réexamen en phase d'analyse ou de conception, et leur transposition dans des contextes variés, peut s'avérer très productif d'idées.

Les interprétations que fait un individu font partie de son « monde à soi »<sup>5</sup>, et représentent donc une part élaborée, sensée, sélective, cultivée, de son rapport aux productions humaines matérielles, symboliques ou conceptuelles. Cette activité intellectuelle d'interprétation est personnelle, singulière, lente, et ne peut prendre place dans les situations d'urgence qui caractérisent souvent les moments de la conception proprement dite. La connaissance issue de l'interprétation n'est pas toujours partageable et a un caractère souvent intime, ce qui est consistant avec le fait que la « créativité » des architectes s'est toujours fondée sur des manières très personnelles de voir le monde. « Le travail en philosophie – comme le travail en architecture – est avant tout un travail sur soi-même. C'est travailler à une conception propre. À la façon dont on voit les choses.

<sup>4</sup> Surtout dans un contexte de conception analogique (Chupin, 1998).

<sup>5</sup> Héraclite avait déjà remarqué ce qu'induit inévitablement l'interprétation : il existe nécessairement un *idios kosmos*, le monde à soi, et un *koinos kosmos*, le monde commun, celui qui peut être partagé.

(Et à ce que l'on attend d'elles) » disait L. Wittgenstein, dans *Remarques mêlées*, cité par J. P. Cometti (1998).

L'émergence de connaissance que permet l'interprétation peut être mémorisée sur un support pour pouvoir être réutilisée. Nous nommons *annotations* les traces de ce travail, qui peuvent être des croquis libres, des surcharges graphiques ou textuelles sur des documents, des textes seuls, etc. Elles ne sont là que pour garder mémoire du travail d'interprétation déjà effectué.

La mémorisation de cette nouvelle représentation peut être faite sous forme numérique, en utilisant des programmes d'ordinateurs adéquats.

On peut ainsi constituer un carnet, une bibliothèque, un répertoire des interprétations. Ce carnet au même titre que les carnets de voyage qu'ont pratiqués beaucoup d'architectes est extensible à l'infini au cours de l'existence.

### 3.4. Systèmes et dispositifs

Un *utilisateur* d'un logiciel fait appel à un *outil* qui propose des *fonctionnalités*. C'est ce que l'on peut retenir de la manière dominante dont nous sont présentés les bons usages des programmes d'ordinateurs.

Cette manière de centrer l'attention sur l'application, très courante pour parler des logiciels de CAO, est d'autant plus utilisée que le logiciel dont on parle est qualifié (parfois à tort) de « système ».

Or, les fonctionnalités ne représentent que des potentialités, qui s'actualisent ou non suivant le bon vouloir ou le niveau d'expertise de l'utilisateur. Plus éclairantes sont les analyses de B. Laurel (1993), cité par D. Stanley (1998), pour examiner un logiciel non pas sous l'angle de ce qu'il « sait » faire, mais sous l'angle de ce qu'un acteur peut en faire, recentrant l'attention sur l'homme et non sur la machine.

La notion de *conversation* avec un logiciel (qui est une idée reçue de la théorie de l'interactivité, selon D. Stanley) nous intéresse moins que la conversation médiatisée par l'usage d'un logiciel qu'un humain peut avoir avec lui-même (ou avec ses semblables). Il s'agit de situations évoquées dans les recherches émergentes sur la coopération humaine médiatisée (et plus généralement le « Computer-Supported Cooperative Work »).

Tout ceci est d'ailleurs assez consistant avec cette forme particulière de « dialogue » dans la conception, que Schön (1987) nommait « la conversation avec les éléments de la situation ».

Un dispositif selon D. Stanley (1998) est composé d'éléments discrets, interconnectés dans un système d'interactions. Il s'agit d'une *disposition*, d'une *configuration* de différentes pièces : « Un dispositif n'est [...] pas un simple ensemble de mécanismes ou de techniques, mais la disposition de ses divers éléments. Cette disposition vient de la composition du mot lui-même. « Dispositif » ne signifie pas seulement un système technique, mais la disposition des éléments de ce système :

dispositif est dérivé du radical latin *dispositum*, supin de *disponere* (*dis* + *ponere*, c'est-à-dire « placer en séparant distinctement » ou « arranger, ordonner, régler »). On peut d'ailleurs distinguer dispositif de système grâce à cette étymologie : le grec *sustéma* décrit un groupement, un « assemblage » ou un « ensemble » dans un seul corps qui se tient debout (*°sista-*, *°sta-* « être debout »), tandis que *disponere* décrit la séparation ou la répartition des différents éléments, chacun dans une sorte de stratégie ».

Plaçons le concepteur lui-même dans la configuration pour ainsi le mettre en relation avec un ensemble de logiciels propres à favoriser chez lui, pendant l'acte de conception, la réutilisation de ses connaissances ainsi que le choix et la maîtrise de différents systèmes de représentation.

Dans une telle disposition, il y a distribution des rôles par le concepteur, les acteurs étant l'architecte lui-même, les logiciels, l'environnement, d'autres objets<sup>6</sup>, mais ces rôles ne sont ni fixés à l'avance, ni immuables (aucune des pièces n'est envisagée pour ses fonctionnalités *particulières*), ni appelés dans des diagrammes séquentiels. Les relations en réseau se déclenchent à la demande de l'un des agents, et placent l'architecte en situation de mobiliser les ressources nécessaires en fonction de l'état d'avancement de ses travaux et du contexte. La configuration rend possible l'interaction, qui se concrétise ou non. On inaugure une scène, (un lieu de représentation, dans tous les sens du terme) sur laquelle le concepteur et la machine interagissent autour d'actions cognitives et productives.

L'homme y dispose, depuis sa place centrale de décision, de la liberté d'action en n'étant pas soumis au modèle formel d'un seul logiciel.

Le partage des rôles laisse chacun des acteurs ce qu'il sait bien faire. À l'acteur humain de percevoir, reconnaître, interpréter, changer de système de représentation, d'échelle, de granularité, manipuler du flou, de l'imprécis, de l'espace symbolique. À l'acteur machine de mémoriser, calculer, retrouver, structurer, ranger, représenter.

Ce réseau permettant de naviguer dans les connaissances et les différentes représentations de l'objet en cours d'élaboration, autorise à l'architecte la projection de son propre réseau de significations dans un contexte donné.

### 3.5. Éléments du dispositif

Les éléments de la configuration ne sont pas tous des programmes d'ordinateur. Le dispositif peut comporter par exemple des livres ou de la colle à maquettes, ou des ustensiles de dessin traditionnels et un numériseur, ou un accès au Web, etc.

<sup>6</sup> des maquettes par exemple, ou tout ce que S. Papert (1980) aurait pu appeler des « objets pour penser avec ».

Nous voulons par contre que les éléments logiciels de la configuration soient très légers, pas forcément interconnectés entre eux (les besoins ne sont pas ici ceux d'une chaîne de production, mais bien ceux d'une activité de conception qui ne peut être une chaîne, même si les logiciels peuvent communiquer, via des formats de données standards<sup>7</sup>), et dont le maniement est suffisamment intuitif ou connu pour ne pas avoir à faire un long apprentissage.

Un élément logiciel léger est pour nous une sorte d'utilitaire, qui a la faculté essentielle de se faire oublier. Un « bon » logiciel dans ce cadre est avant tout un logiciel au maniement tellement intuitif que l'on oublie rapidement sa présence, c'est à dire que l'on s'en sert.

Car c'est une tâche de conception que l'on a à mener, pas une tâche de pilotage délicat d'un lourd système qui détournerait une partie de nos capacités vers sa conduite même<sup>8</sup>.

Chaque élément de l'ensemble contiendra en quelque sorte de la connaissance architecturale ou technique, pourra « savoir » manipuler le type d'objet pour lequel on l'a convoqué à un instant donné, et devra pouvoir le faire dans le système de représentation souhaité, à l'échelle (au sens large) voulue. L'objet doit s'entendre ici comme toute entité manipulable en cours de conception, y compris les objets symboliques (Lebahar, 1997).

Ainsi le réseau doit pouvoir représenter et manipuler des connaissances architecturales, de manière certainement incomplète ou parcellaire, échappant ainsi à un défaut majeur des logiciels de CAO qui ne permettent de manipuler que des *données*, souvent exclusivement quantitatives, relatives à un projet.

#### 4. Une expérimentation dans l'enseignement de la conception

Nous travaillons depuis quelques années à la spécification de divers éléments de tels types de dispositifs qui, tout en permettant de rendre les services d'un carnet de voyage traditionnel, verraient leur potentiel d'utilisation démultiplié par les techniques numériques par :

- accès plus diversifiés aux sources, repérage de leur localisation, variété de leurs représentations ;
- facilité d'organisation du réseau sémantique, de recherches et de navigation dans le carnet constitué (par des techniques hypertexte) ;
- collecte automatique du vocabulaire du concepteur, mis en relation avec divers types de dictionnaires à commencer par celui de sa propre langue, et qui, via un thesaurus, est

<sup>7</sup> pour que l'ensemble du dispositif soit modelable à volonté bien sûr, et éviter les formats propriétaires qui lient à des outils dont on peut vouloir se séparer.

<sup>8</sup> On peut voir certains enseignements en école d'architecture plus tournés vers l'art du pilotage de gros logiciels de CAO que vers celui de l'apprentissage de la conception.

capable de lui suggérer s'il le désire de puissantes possibilités de mise en relation analogiques.

Ces recherches, après plusieurs maquettes (Léglise, 1997), ont abouti à un dispositif mis en place dans l'enseignement, et dont nous vivons la troisième année universitaire d'existence. Il nous semblait en effet nécessaire de prouver que l'on pouvait imaginer une partie d'un dispositif concret, et le tester en situation opérationnelle.

Situation d'apprentissage de la conception et situation de conception professionnelle sont différentes. Cependant, le dispositif a été mis en place par J. P. Chupin, M. Léglise et G. Tiné (un architecte, un informaticien et un plasticien) pour favoriser des exercices de conception destinés à des étudiants instruits d'une certaine maîtrise, en dernière année de cursus. Ainsi n'est-on pas si loin des activités de préconception que l'on peut constater en situation d'agence.

Nous avons décrit les éléments de cet ensemble, ainsi que ses attendus pédagogiques (Chupin & Léglise, 1996). Les résultats obtenus pour la première année ont été très précisément présentés et analysés dans (Chupin 1998).

Le contexte pédagogique permet un retour critique sur les connaissances, et la place possible de l'informatique dans l'activité de conception à un niveau *plus mental qu'instrumental* (Léglise 1998). Le but est d'interroger les conditions et les opérations de conception, en faisant des exercices applicatifs qui ne sont pas des projets, tout en utilisant un dispositif comportant une panoplie de logiciels légers (dont un – celui qui représente le carnet numérique – a été écrit spécifiquement, alors que les autres sont tous assez généralistes, de type freeware ou shareware) et un atelier maquettes.

Les exercices se déroulent suivant trois rythmes différenciés, après annonce d'un thème général :

- une phase lente de constitution d'une mémoire structurée, par recherche dans la « mémoire du monde » (revues, livres encyclopédies, Web, mais aussi objets manufacturés de toutes natures jugés en rapport avec le thème...), puis par structuration personnelle à des fins heuristiques en utilisant l'ensemble d'outils informatiques mentionné ci-dessus

- un volet d'exercices intensifs de conception en atelier, où se tissent les rapports entre cette mémoire et l'objet en conception, et qui permettent des figurations matérielles rapides

- la rédaction d'un mémoire de retour réflexif et critique sur la totalité de l'expérience.

Les opérations cognitives encouragées par ce dispositif concernent essentiellement les opérations de schématisation, de surcharge, les croquis, les annotations et les énoncés descriptifs sur le support du carnet. Une base de données de représentations de précédents pédagogiquement construite, dont les éléments ont été glanés cette année par

les étudiants sur le Web, sert de réservoir possible aux illustrations des pages du carnet<sup>9</sup>. Le dispositif propose des stimulations de facultés d'interprétation et de reliance par ces facilités d'annotations graphiques et textuelles.

Il revient ainsi à l'acteur étudiant d'interpréter et de mettre en relation, la machine se trouvant quant à elle sollicitée dans un rôle heuristique pour répertorier, pour mémoriser la trace de ces schématisation puis pour faciliter la recherche et la récupération.

Cet apprentissage de la conception par immersion dans ce dispositif constitué nous propose un autre rapport à l'utilisation de l'ordinateur : l'étudiant n'est plus aidé par un logiciel pour la mise en forme finale, mais son activité intellectuelle est enrichie, stimulée, démultipliée par l'emploi d'un dispositif approprié dont la configuration mouvante comporte des logiciels.

## 5. Pour une attitude active en situation informatisée

Nous avons essayé de montrer que l'aide par un logiciel de conception assistée passait par une activité de *modélisation*, où l'on traite de *l'information* en utilisant un *système*.

Nous avons proposé de focaliser la vue sur le *concepteur*, et non plus sur le logiciel. Nous préconisons une approche de type *dispositif* qui permet au concepteur de répartir ses aides de manière dynamique entre plusieurs éléments hybrides. Cet arrangement lui permet de manipuler des *connaissances* qu'il aura mises en forme par *interprétations* de ses perceptions, de manière à *stimuler* son activité de conception.

En phase d'analyse, c'est à dire en phase intellectuelle de mises en relations d'objets, de concepts, de mots, de représentations, autrement dit en phase de recherche de sens, y compris pour l'apprentissage, les machines peuvent nous apporter un soutien de mémorisation, de mise en forme et de maintien de liens découverts ou calculés, ainsi que de rappel approprié de nos opérations sémantiques.

Ces outils d'interprétation et d'appropriation nous paraissent encore plus nécessaires aujourd'hui alors que le Web est en train de devenir une source documentaire de premier plan.

Dans cette optique de dispositif plutôt que dans une vision de système, nous pouvons, pour les phases de préconception au moins, échapper à l'emprise grandissante des logiciels monolithiques d'aide à la conception qui induisent implicitement des contraintes prescriptives.

---

<sup>9</sup> Dans cette situation, l'objet présent sur le Web est déjà médiatisé, et interpréter doit être précédé d'une opération de sélection d'objets représentés : ne pouvant saisir un objet dans son environnement immédiat, l'étudiant doit interpréter une interprétation déjà faite par l'auteur de l'image sur la toile.

En libérant l'architecte de ces contraintes implicites des modèles formels, en lui donnant les instruments de l'autonomie devant l'impressionnante quantité de représentations à sa disposition, en l'incitant petit à petit transformer cette masse en un répertoire personnel approprié, on lui permet de transformer de l'information en connaissance.

On tente ainsi de perpétuer, avec des technologies modernes, une tradition qui veut que la production de l'architecture se fonde sur une approche sensible, cultivée, personnelle, érudite du monde qui nous entoure.

## Bibliographie

- Amphoux, P., & al. : 1998, La notion d'ambiance, une mutation de la pensée urbaine et de la pratique architecturale, *rapport de recherche n  140, IREC, département d'architecture,  cole polytechnique fédérale de Lausanne*, Lausanne, pp. 96-97.
- Boudon, Pierre : 1992, *Le paradigme de l'architecture*, L'Univers des discours, Montréal.
- Boudon, Ph. & al. : 1994, *Enseigner la conception architecturale*, Les  ditions de la Villette, Paris.
- Burdese, J. C. : 1989, La conception architecturale, tradition et CAO, *Rapport final d'une recherche financée par le Ministère de l'équipement et du Logement, Bureau de la recherche architecturale, convention n  87.01.447*, Lille.
- Chupin, J. P. : 1998, Le projet analogue : les phases analogiques du projet d'architecture en situation pédagogique, *Thèse de Ph.D. de la Faculté d'aménagement de l'Université de Montréal*.
- Chupin, J. P., L glise, M. : 1996, Un carnet de schémas analogiques pour les phases préliminaires de la conception architecturale, *Revue Sciences et Techniques de la Conception [Journal of Design Sciences and Technology]*, 5(2), 23-44.
- Cometti, J. P. : 1998, *La maison de Wittgenstein*, Presses Universitaires de France, Paris.
- Conan, M. : 1989, Les processus de conception architecturale, *Rapport final de recherche, convention CSTB/Plan Construction n  87 61 434*, Paris.
- Gero, J. S. & Damski, J. C. : 1994, Object emergence in 3D using a data-driven approach, in Gero J.S. and Sudweeks F. (eds), *Artificial Intelligence in Design '94*, Kluwer Academic Publishers.
- Goulette, J. P. : 1997, Représentation des connaissances spatiales en conception architecturale. Contribution au raisonnement spatial qualitatif, *Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse*.

- Goulette, J. P., & Léglise, M., : 1996, Writing images and drawing words: ideation in architectural design, *Anais do Graphica'96, 1° Congresso Internacional de Engenharia Gráfica nas Artes e no Desenho, Florianópolis (Brésil)*, pp. 332-342.
- Hamel, R. : 1994, A model of the architectural design process, and some implications, in A. Tzonis, I. White, (eds), *Automation Based Creative Design*, Elsevier Science B.V., pp. 333-347.
- Jean, C. & Pousin, F. : 1995, Objets informatiques et conception architecturale, *Revue des sciences et techniques de la conception*, 4(2), 35-52.
- Laurel B. : 1993, *Computers as Theatre*, Addison-Wesley, pp. 43-44.
- Lawson, B. : 1980, *How Designers Think*, The Architectural Press Ltd., London.
- Lawson, B., & Ming Loke, S. : 1996, Computers, words and pictures, in L. Candy & E. Edmonds (eds), *Proceedings of 2<sup>nd</sup> international symposium Creativity & Cognition, Loughborough, UK*, pp. 108-120.
- Lebahar, J. C. : 1983, *Le dessin d'architecte*, Parenthèses, Marseille.
- Lebahar, J. C., 1997, Les "objets" de la conception : de la permanence du complexe polysensoriel à l'artefact cognitif, in B. Trousse & K. Zreik, (eds), *Actes de 01Design '97 : les objets en conception*, EuropIA productions, Paris, pp. 177-187.
- Le Corbusier : 1981-82, *Carnets*, Hersher/Dessain et Tolra, Paris.
- Léglise, M. : 1995, Art Under Constraint, Preserving the creative dimension in computer aided architectural design, *Languages of Design*, 3(1), 55-72.
- M. Léglise : 1997, Des objets architecturaux aux objets de la conception architecturale in B. Trousse & K. Zreik, (eds), *Actes de 01Design '97 : les objets en conception*, EuropIA productions, Paris, pp. 19-31.
- M. Léglise : 1998, Ordinateurs dans l'apprentissage de la conception : mental et instrumental, in M. Porada (ed), *Actes du colloque eCAADe'98*, Paris, pp. 138-145.
- Papert, S. : 1980, *Mindstorms, Children, Computers and Powerful Ideas*, Basic Books, NY, (traduction française : *Jaillissement de l'esprit*, Flammarion, Paris)
- Quinrand, P., Les problèmes de la conception assistée par ordinateur en architecture, *Carré bleu*, 2(3), Paris, 1986.
- Raynaud, D. : 1998, *Architectures comparées, essai sur la dynamique des formes*, Parenthèses, Marseille.
- Ricœur, P. : 1965, *De l'interprétation*, Seuil, Paris.
- Schön, Donald A. : 1987, *Educating the reflective practitioner: toward a new design for teaching and learning in the professions*, San Francisco.
- Schön, D. A. : 1994, *Le praticien réflexif (À la recherche du savoir caché dans l'agir professionnel)*, Les éditions logiques, Montréal.
- Sottinel, F., Délépine, O., Jézéquelou, D. : 1993, Une vision non additionnelle du processus de conception, in *Actes des séminaires inter chercheurs*, éditions du GIP ACACIA, Toulouse, pp. 75-82.

- Stanley, D. E. : 1998, Essais d'interactivité, Hypothèses, analyses et expériences, Laboratoire ifi, Université Paris 8, [www.labart.univ-paris8.fr/ifi/](http://www.labart.univ-paris8.fr/ifi/)
- Venturi, R. : 1966, *De l'ambiguïté en architecture*, Dunod, Paris.

## **De la modélisation du processus de construction à la construction du processus de modélisation**

**Marius Bogdan, Giovanni De Paoli**

*Groupe de recherche en CAO, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal*

**Résumé.** *Dans cet article nous proposons (i) une analyse des approches contemporaines les plus innovatrices en conception architecturale assistée par ordinateur du point de vue du support que ces approches apportent à l'architecte dans les premières phases du design, et (ii) une exploration des voies qui permettraient un meilleur partenariat entre l'architecte et l'ordinateur.*

*Parmi les différentes approches qui existent, nous analyserons plus particulièrement la modélisation des actions et la modélisation des processus de construction du point de vue de leur capacité d'en capsuler une connaissance, un savoir-faire. Aussi, ces approches seront analysées du point de vue des limitations qu'elles imposent au savoir être de l'architecte, c'est-à-dire à sa capacité d'innovation et de création qu'il exploite surtout dans les premières phases du design.*

*Dans un deuxième temps, nous allons examiner quelques pistes de recherche que des travaux récents dans le domaine de l'intelligence artificielle permettent d'ouvrir pour la conception architecturale assistée par ordinateur. Partant de la prémisse qu'il faut concevoir des outils cognitifs qui (i) permettent à l'architecte en situation de conception d'être conscient de l'état de l'objet en cours d'être conçu (en termes de valeurs quantitatives et qualitatives des diverses propriétés de l'objet et des relations entre ces propriétés) et, conséquemment, que (ii) l'objet doit « informer » le concepteur. Nous allons explorer des travaux concernant les systèmes de « vie artificielle » pour établir en quelle mesure on pourrait développer un dialogue entre le concepteur et l'objet conçu afin d'aboutir à un processus de modélisation qui se construit pas à pas et de manière consciente.*

**Mots clés :** architecture, CAO, intelligence artificielle, maquette procédurale

## 1. Introduction

Aujourd'hui, la recherche en informatique dépasse le cadre strictement technique ; l'informatique devient une science qui étudie aussi les propriétés de la substance sur laquelle elle travaille, l'information. Elle étudie la façon dont l'information est produite, codifiée et transmise à la machine par les humains, comment elle est traitée et de quelle façon les résultats de ces traitements nous sont retransmis afin qu'ils soient décodés, compris. Conséquemment, l'informatique devient une science cognitive, cherchant à comprendre les humains et leurs limites en ce qui a trait à leur facultés de perception, d'action et de compréhension.

Dans le domaine de la CAO en architecture et design, les récentes approches de recherche ont soulevé un questionnement sur le support que l'ordinateur apporte au concepteur dans les premières phases du design. Ceci nous a amené à considérer le rôle du croquis dans le processus de conception ainsi que la nature même de ce processus. Aussi, nous avons exploré des voies qui permettraient un meilleur partenariat entre l'ordinateur et le concepteur à travers les résultats d'une série d'expériences que nous avons menées. Ces expériences, qui avaient pour objectifs initial la modélisation des techniques et des processus de constructions, se sont enrichies au fur et à mesure par une quête de sens de l'objet à modéliser. Les résultats que nous avons obtenus ont orienté notre réflexion actuelle vers la question : comment l'outil informatique pourrait-il être amené à accompagner le concepteur lors du processus de design ?

## 2. La conception et l'ordinateur dans les premières phases de design

Le fait que l'ordinateur soit confiné aujourd'hui principalement aux tâches de représentation des objets dans leur apparence finale a des raisons historiques. Les travaux de Tidafi (1996, 1997) et de De Paoli (1997) démontrent que les pratiques de la représentation en architecture introduites à la Renaissance ont opéré une réduction sémantique de l'objet représenté. Ainsi, la découverte de la perspective et la maîtrise des projections orthogonales, ont conduit, depuis 400 ans, au développement de techniques de représentation des objets de plus en plus sophistiquées. Nous considérons que ces développements, qui au niveau des ordinateurs se matérialisent maintenant par des techniques de dessin et de production d'images de synthèse, sont en même temps la source de la difficulté actuelle d'accompagner le processus de conception par l'outil informatique. L'ordinateur reste confiné essentiellement dans des tâches de représentation.

Des tentatives pour remédier à cette situation ont été faites en essayant d'introduire l'ordinateur dans les premières phases du design. Une des plus originales propositions est la « planche à dessin électronique » (Park, 1996). Partant du constat, que nous partageons entièrement, que la conception est une conversation réflexive avec un médium visuel, Park propose un mécanisme qui (i) peut enregistrer le processus de conception, (ii) peut utiliser plusieurs idées simultanément, et (iii) permet une rétroaction sur le résultat graphique obtenu. Le médium visuel utilisé est le croquis, qui pendant le processus de conception est filmé à certains intervalles, enregistré et re-projeté sur la table à dessin.

Pourquoi le croquis ? Faut-il le considérer comme le seul moyen de communication du designer avec lui-même ?

Nous allons analyser le rôle du croquis afin de comprendre (i) quelle partie du processus de conception il sous-tend, et conséquemment (ii) comment on pourrait construire des outils informatiques dont le rôle sera équivalent à celui du croquis.

Le croquis est l'outil de conception le plus présent dans les activités des designers et des architectes. Pour Calatrava (1991), *sketching*, l'action de faire le croquis, est fondamentale dans le sens que le concepteur est en situation de dialogue. Également, dans la littérature qui traite des processus cognitifs impliqués dans la conception, le croquis est présenté comme un outil soutenant une activité essentiellement créative : le croquis favorise l'accès à une nouvelle connaissance ; il agit comme d'une forme de mémoire externe à court terme ; il permet de traiter une quantité phénoménale d'informations, typiques aux problèmes complexes, mal définis, auquel fait face le concepteur pendant le processus de design (Suwa et Tversky 1997 ; McGown et Green, 1998 ; Kavakali *et al.* 1998 ; Purcell et Gero 1998 ; Verstijnen et Hennessey, 1998 ; Cross, 1999). Selon Rodgers et Huxor (1998), le croquis permet aussi d'enregistrer les séquences d'un processus. Cependant, l'activité cognitive qui a conduit à ce croquis n'est d'aucune manière consignée, ni contenue dans son résultat.

L'activité cognitive impliquée dans le processus de conception, a été étudiée selon plusieurs axes : entrevues avec des concepteurs, études de cas, étude de protocole, simulation, et analyse théorique (Eisentraut et Günther, 1997 ; Goldshmidt 1997 ; Parent 1997 ; Gero, 1998 ; Rosenman et Gero 1998).

Un intérêt particulier pour notre recherche vient des études de protocole menées par Gero (1998) et Rosenman et Gero (1998). Leurs études ont abouti à une série de modèles descriptifs de la conception : combinaison, mutation, analogie, ou principe premier. Nous avons intégré dans les outils informatiques que nous avons construits lors de nos expérimentations toutes ces possibilités d'agir comme un objet générique, un objet de départ (De Paoli et Bogdan, 1999).

À part l'effort qui a été fait pour structurer les données concernant les activités du concepteur, les études de protocole ont aussi mis en évidence le fait que (i) pendant la

conception il y a différents niveaux de réflexion, et que (ii) le processus de conception est un phénomène qui se développe dans le temps sans toute fois être linéaire (Gero 1998).

Afin de faire le pont entre l'activité de conception et son résultat, l'objet conçu, il faut également considérer les résultats des recherches qui se sont donnés comme direction de répondre à la question « qu'est ce que l'objet ? ». Des recherches dans les grammaires des formes ont approché l'objet du point de vue stylistique, définissant un ensemble d'adjectifs auquel des mécanismes de pondération ont été associés, permettant de regrouper les objets par profils stylistique. À l'intérieur des profils, des attributs stylistiques groupés en plusieurs catégories sont évalués selon une échelle commune et indépendante du style, qui traite en fait de propriétés de l'objet.

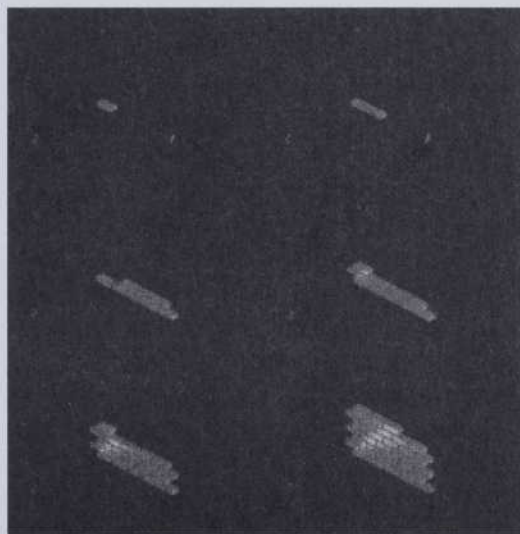
Ainsi, un objet peut être défini non pas par son apparence, mais par ses propriétés : harmonie - contrats, statique - dynamique, dur - mou, chaud - froid, etc. (Chen et Owen, 1997, 1998). Plusieurs recherches en CAO ont approché récemment la modélisation par le biais des propriétés des objets (Bogdan 1997 ; Hsiao et Chen, 1997; Hsiao et Wang, 1998). Ces recherches ont abouti généralement à la construction de prototypes informatiques pouvant créer des familles d'objets dont une série des propriétés peuvent être quantifiées et spécifiées. Les spécifications sont appliquées à des formes génériques, des méta-objets, avec l'objectif de construire des objets particuliers qu'on peut transformer en agissant sur les propriétés qui les définissent. Encore plus, pour aller au-delà des mots, certains parmi ces prototypes informatiques permettent d'opérer les transformations sémantiques sur des modèles géométriques tridimensionnels génériques en faisant appel à des outils symboliques. Hsiao et Wang (1998), par exemple, proposent l'utilisation d'une « icône représentant un gâteau » pour opérer une transformation sémantique sur le design de la forme, dans ce cas spécifique « adoucir les formes ».

À notre avis, les recherches mentionnées ci-dessus démontrent clairement qu'une transition vers un nouveau paradigme de modélisation, où la représentation de l'objet devient secondaire face à une approche sémantique, est en train de s'opérer. Nos explorations des voies qui permettraient un meilleur partenariat entre l'architecte et l'ordinateur dont il y sera question dans les paragraphes suivants s'inscrivent dans ce nouveau paradigme.

### **3. Vers un nouveau paradigme de modélisation. Exploration des voies qui permettraient un meilleur partenariat entre l'architecte et l'ordinateur**

Nous présentons ci-dessous deux des essais que nous avons réalisé afin d'explorer des voies qui permettraient un meilleur partenariat entre l'ordinateur et l'architecte dans les premières phases de design.

Dans notre première expérience, nous nous sommes proposé d'utiliser l'ordinateur pour la construction d'un mur en maçonnerie. Pour cela, nous nous sommes intéressés à l'approche de la «*projétation*» par les propriétés de l'objet (propriétés que nous appelons opérateurs sémantiques) plutôt que par les primitives géométriques en lui ajoutant une connaissance qui a été encapsulée dans une maquette procédurale. À cette maquette générique, la maquette de départ, nous avons rajouté le «*logos*» par la modélisation du processus de construction. Ainsi, nous avons réussi à décrire et à transmettre à l'ordinateur le processus spatial et temporel de la construction d'un mur en maçonnerie. Cette description du processus a été possible par l'expression de la méthode de construction dans un langage fonctionnel, permettant la modélisation des actions. (Tidafi, 1996) Le processus récursif de construction brique par brique où la position de chacune des briques est déterminée par celle d'avant a été traduit en algorithmes et exprimé en langage de programmation. (Figure 1)



*Figure 1.* Processus spatial et temporel de la construction d'un mur, savoir et savoir-faire

La deuxième expérience, plus étendue, a été celle que nous avons fait sur le théâtre romain de Vitruve. En partant de la description de ce théâtre telle qu'elle a été faite par Vitruve, nous avons d'abord interprété les opérations de construction et nous les avons regroupées dans des modules que nous avons traduits et visualisés d'une manière relativement classique avec un programme de dessin assisté par ordinateur. Chaque séquence, qui correspond à une des phrases de Vitruve, exprime une opération de construction traduite en primitives géométriques. Ensuite, à l'aide d'un langage fonctionnel nous avons traduit les primitives géométriques et les opérateurs en fonction pour pouvoir les assembler dans une maquette procédurale.

La maquette procédurale permet de figurer le théâtre à l'aide d'un programme de modélisation volumique, et, surtout, de lui rajouter de nouvelles propriétés comme la visibilité ou des propriétés acoustiques (Figure 2). Ce qui a fait la particularité de cette traduction a été la modularité poursuivie afin de laisser la possibilité de rajouter des nouvelles fonctions à notre maquette procédurale ; elle est en effet une méta-fonction, c'est à dire, une fonction où les paramètres sont à leurs tours des fonctions. La maquette procédurale ainsi obtenue est un outil qui permet de modéliser des théâtres, des stades, des auditoriums et tout autre espace de cette nature construits depuis deux mille ans jusqu'à nos jours.

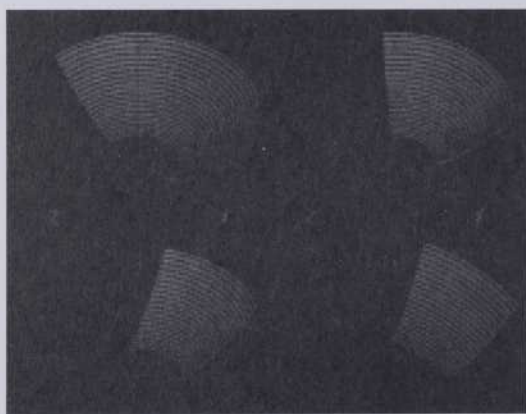


Figure 2. La maquette procédurale du théâtre

À part cet intérêt, la maquette procédurale ouvre aussi la possibilité de s'en servir, comme un outil de croquis volumique, en agissant sur les propriétés qui y sont

encapsulées. Donc, nous avons considéré cet outil (la maquette procédurale) comme un outil d'aide à la conception, permettant une réflexion, étant un outil sémantique permettant de réduire l'écart entre la représentation de l'objet et son résultat.

À la suite de cette deuxième expérience, deux aspects ont enrichi notre réflexion. Premièrement, l'ajout de certaines fonctions, comme par exemple la traduction d'une des propriétés acoustiques et la réverbération dans le but de contrôler la position du plafond d'un théâtre, a conduit à ce que les divers modules dont l'objet est constitué interagissent de manière autonome entre eux. Nous avons remarqué que l'objet manifeste une certaine autonomie, dans le sens que le résultat d'une action sur une propriété, la visibilité, par exemple, se répercute sur l'acoustique, amenant ainsi le concepteur à une série de rétroactions, au fur et à mesure que l'objet informe le concepteur de son état. Cela démontre que nous sommes manifestement en situation de dialogue et que nous nous retrouvons dans une situation analogue à l'utilisation du croquis dont il a été question au début de l'article. Cependant, cette fois-ci, le croquis classique est remplacé par la maquette procédurale que nous avons conçue ; elle devient un outil de croquis volumique.

Partant de ce premier constat, nous avons exploré un deuxième aspect qui nous permet de proposer comme nouvelle piste d'exploration l'utilisation de maquettes procédurales qui permettent de consigner et d'accumuler automatiquement les agissements qu'un concepteur aurait sur les propriétés d'un objet dans le contexte de la conception. En effet, nous avons remarqué que jusqu'à présent les ordinateurs ont été instruits par les programmeurs alors que le cerveau apprend et conçoit par la pratique, et par un dialogue avec le médium qui traditionnellement est le papier. Or, si la maquette procédurale devient le médium qui supporte le dialogue entre le concepteur et l'objet en train d'être conçu, l'ordinateur pourrait apprendre à connaître la façon de fonctionner de l'utilisateur en stockant dans une base de données l'évolution des valeurs des divers paramètres qui définissent l'objet par ses propriétés et sur lesquels le concepteur intervient.

Dans ce contexte, en nous inspirant des techniques de « simulation de la vie » amenées par les études en intelligence artificielle appliquées aux jeux, nous croyons qu'il est possible de concevoir des outils informatiques d'aide à la conception articulés autour de deux « moteurs » : (i) un moteur comportemental, qui contient la connaissance sur l'objet et qui modifie l'état de l'objet en fonction des actions du concepteur et des relations internes de l'objet, et (ii) un moteur cognitif, qui va suivre et enregistrer la façon dont le concepteur agit sur les propriétés de l'objet. Les données que le moteur cognitif permettrait d'accumuler seraient prises en compte par le moteur comportemental qui pourrait faire des propositions de modification des paramètres de l'objet de façon autonome.

Notre proposition est très différente des divers outils et systèmes d'aide à la décision qui existent et qui se basent sur l'application d'un ensemble de règles à l'aide de

mécanisme d'inférence ; elle est différente aussi des mécanismes qui déroulent en avance des arborescences concernant les actions possibles de l'utilisateur et qui contiennent des critères prédéfinis. Dans cette proposition il s'agit plutôt de rendre l'ordinateur attentif aux actions du concepteur et de l'amener à construire une micro-base de données sur sa façon de fonctionner, afin de savoir répondre à des questions que le concepteur ne s'est pas encore posé.

Nous envisageons un partenariat, une coopération homme-machine intégrant des outils cognitifs, qui suivent le concepteur et l'informent de l'état de l'objet en train d'être conçu. Cela devrait permettre (i) de former la machine à l'humain et non pas l'inverse, et (ii) d'amener à ce que, dans une situation quelconque, l'ordinateur propose des valeurs de départ pour les propriétés des maquettes procédurales se situant dans des plages déterminées par les activités de conception antérieures, accompagnant donc le concepteur lors de la construction du processus de conception.

#### 4. Conclusion

En partant du rôle du croquis dans le processus de conception, nous avons analysé les approches contemporaines en conception architecturale assistée par ordinateur du point de vue du support que ces approches apportent à l'architecte dans les premières phases du design. Notre analyse est concentrée plus particulièrement sur la modélisation des actions et la modélisation des processus de construction. Nous avons regardé leur capacité d'encapsuler une connaissance, un savoir-faire et les limitations qu'elles imposent à la capacité d'innovation et de création que l'architecte exploite surtout dans les premières phases du design. Notre analyse nous a amené à saisir qu'une transition vers un nouveau paradigme de modélisation est en train de s'opérer, et que dans ce nouveau paradigme la représentation de l'objet devient secondaire face à une approche sémantique. Nos explorations des voies qui permettraient un meilleur partenariat entre l'architecte et l'ordinateur dans les premières phases de design, et qui s'inscrivent dans ce nouveau paradigme, ont aussi été présentées. Finalement, suite aux résultats de nos recherches, nous croyons appropriée l'utilisation d'une maquette procédurale comme outil de croquis volumique pendant les premières phases de design. Aussi, nous croyons qu'il est possible de concevoir des outils informatiques d'aide à la conception articulés autour de deux « moteurs » : (i) un moteur comportemental, et (ii) un moteur cognitif. Cet outil, pourrait accomplir une coopération homme-machine et accompagner le concepteur lors de la construction du processus de conception.

## Références

- BOGDAN, M. (1997) *La voûte byzantine, modélisation du processus de construction*, Note interne, GRCAO, Université de Montréal, Faculté de l'Aménagement, Montréal
- CHEN, K. et OWEN, C.L. (1997) « Form language and style description », *Design Studies*, vol. 18, no. 3, July, pp. 249-274
- CHEN, K. et OWEN, C.L. (1998) « A study of computer-supported formal design », *Design Studies*, vol. 19, no. 3, July, pp. 331-359
- CROSS, N. (1999) « Natural intelligence in design », *Design Studies*, vol. 20, no. 1, January, pp. 25-38
- EISENTRAUT, R. et GÜNTHER, J. (1997) « Individual styles of problem solving in their relation to representations in the design process », *Design Studies*, vol. 18, no. 4, October, pp. 369-383
- DE PAOLI, G. (1997) « La CAO en architecture : modélisations des actions et définition des opérateurs », *Actes de 01DESIGN, les objets en conception*, Sophia Antipolis
- DE PAOLI, G. et BOGDAN, M. (1999) « The backstage of Vitruvius' Roman Theatre : A new method of Computer-Aided Design that Reduces the Gap between the Functional and the Operational », *CAADRIA 99*, Shanghai
- GERO, J., S. (1998) « An approach to the analysis of design protocols », *Design Studies*, vol.1, january, pp. 21-61
- GOLDSCHMIDT, G. (1997) « Capturing indeterminism : representation in the design problem space », *Design Studies*, vol. 18, no. 4, October, pp. 441-455
- HSIAO, S.-W. et CHEN, C.-H. (1997) « A semantic and shape grammar based approach for product design », *Design Studies*, vol. 18, no. 3, July, pp. 275-296
- HSIAO, S.-W. et WANG, H.-P. (1998) « Applying the semantic transformation method to product form design », *Design Studies*, vol. 19, no. 3, July, pp. 331-359
- KAVAKALI, M., SCRIVENER, S.A.R., BALL, L.J.B. (1998) « Structure in idea sketching behaviour », *Design Studies*, vol. 19, no. 4, Octobre, pp. 485-517
- McGOWN, A. et GREEN, G. (1998) « Visible ideas : information patterns of conceptual sketch activity », *Design Studies*, vol. 19, no. 4, October, pp. 431-453
- PARK, H. (1996) « The use of paper as a Digital Medium », *Edinburgh Architecture Research*, vol.23, pp. 128-143
- PARENT, A. (1997) « Analysis design-oriented dialogues : a case study in conceptual data modelling », *Design Studies*, vol. 18, no.1, January, pp. 43-66
- PURCELL, A.T., et GERO, J.S. (1998) « Drawings and the design process », *Design Studies*, vol. 19, no. 4, October, pp. 389-430
- RODGERS, P.A. et HUXOR, A.P. (1998) « The rôle of artificial intelligence as 'text' within design », *Design Studies*, vol. 19, no. 2, April, pp. 143-160

- ROSENMAN, M.A. et GERO, J.S. (1998) « Purpose and function in design : from the socio-cultural to the techno-physical », *Design Studies*, vol. 19, no. 2, April, pp. 161-186
- SUWA, M. et TVERSKY, B. (1997) « What do architects and students perceive in their design sketches ? A protocol analysis », *Design Studies*, vol. 18, no. 4, October, pp. 385-440
- TIDAFI, T. (1997) « Architectural simulation by modeling procedures : The creation of the Church of Saint-Eustache in Paris », STREMAH 97
- TIDAFI, T. (1996) *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
- VERSTIJNEN, I.M., HENNESSEY, M.J., (1998) « Sketching and creative discovery », *Design Studies*, vol. 19, no. 4, Octobre, pp. 519-546

## Réflexion sur une uniformisation de données pour la description d'objets physiques

**Manon Guité, Claude Parisel**

*Groupe de recherche en CAO, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal*

**Résumé.** *Les travaux de modélisation de la colline parlementaire de la Ville de Québec ont permis de mettre en évidence les lacunes inhérentes à l'absence d'une norme de description des informations pour construire et exploiter un modèle numérique d'un environnement physique urbain. Il apparaît que la représentation, l'articulation et l'organisation des composants de la plupart des maquettes numériques sont déterminées par le degré de liberté offert par les logiciels de CAO disponibles et par les pratiques non concertées des usagers. L'objectif principal des travaux de modélisation consistait à traduire la maquette numérique existante en modèle volumique pour traiter celui-ci de façon systématique et d'élargir son exploitation au delà de la simple visualisation. Ce travail nous a rapidement confronté à l'obligation de corriger et parfois même de reprendre les données de la maquette numérique existante et de considérer la mise en place d'une nouvelle approche de modélisation qui a mené à l'élaboration d'une norme de description des informations.*

*Dans cet article nous présentons une nouvelle approche de modélisation basée sur des règles de description ainsi que des formats d'enregistrement qui définissent une norme cohérente et logique pour l'exploitation d'un modèle numérique d'un environnement physique urbain.*

## 1. Introduction

Les travaux de modélisation de la colline parlementaire de la Ville de Québec, effectués dans le cadre d'un mandat confié au Groupe de Recherche en CAO (GRCAO) de l'Université de Montréal par la Commission de la Capitale Nationale du Québec, ont permis de mettre en évidence les lacunes inhérentes à l'absence d'une norme de description des informations pour construire et exploiter un modèle numérique d'un environnement physique urbain. L'objectif principal de ces travaux de modélisation consistait à traduire la maquette numérique existante en modèle volumique pour traiter celui-ci de façon systématique et d'élargir son exploitation au delà de la simple visualisation. Ce travail nous a rapidement confronté à l'obligation de corriger et parfois même de reprendre les données de la maquette numérique existante et de considérer la mise en place d'une nouvelle approche de modélisation qui a mené à l'élaboration d'une norme de description.

Dans cet article nous présentons une nouvelle approche de modélisation basée sur des règles de description ainsi que des formats d'enregistrement qui définissent une norme cohérente et logique pour l'exploitation d'un modèle numérique d'un environnement physique urbain.

Nous remercions la Commission de la Capitale Nationale du Québec d'avoir permis la diffusion de ces résultats préliminaires. Tous les exemples présentés dans cet article proviennent de la maquette de la colline parlementaire de la Ville de Québec et cette maquette, il faut le souligner, est très représentative de la plupart des modèles numériques 3D utilisés dans les grandes municipalités.

## 2. Contexte général

L'informatisation de la gestion urbaine s'est développée considérablement ces dernières années et il est maintenant possible d'enregistrer, de sélectionner, de filtrer, d'ordonner et de traiter une grande quantité d'informations de façon rapide et partagée. Deux développements caractérisent ce domaine. Un premier en rapport à l'exploitation d'informations de type alphanumérique d'où résulte une multitude de bases de données qui comportent aujourd'hui des centaines de milliers de champs d'information et un deuxième en rapport au traitement de données géométriques.

La constitution d'un équivalent numérique pour les informations à caractère géométrique a pris deux formes: (1) la numérisation vectorielle de cartes existantes en deux dimensions et (2) la construction de maquettes tridimensionnelles, devant servir à la visualisation. Dans ces deux cas, on trouve une multitude de façons de faire qui reflète à la fois le degré de liberté offert par les différents logiciels de CAO utilisés et l'absence de règles et de méthodes communes pour la représentation des informations à caractère géométrique.

Il résulte de cette situation qu'un même élément comme par exemple un périmètre d'implantation d'un bâtiment peut être décrit à l'aide de lignes, de polygones ou de faces, avec une précision variable et ceci, sur des couches et avec des couleurs différentes. De cette diversité émerge une série de problèmes. D'une part, il faut noter une grande difficulté de transférer l'information entre logiciels et environnements. D'autre part, on remarque une impossibilité à établir des relations entre les données alphanumériques des bases de données d'une ville, les informations géométriques des modèles 2D comme le cadastre et les modèles 3D construits pour la visualisation.

Par ailleurs, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) qui assurent les liens entre des entités géométriques (points, lignes et polygones) et des données alphanumériques offrent des descriptions géométriques très limitées et ne peuvent soutenir pleinement la construction d'un modèle 3D réaliste.

Il ressort de ce contexte, la nécessité d'établir une norme de description qui assure une cohérence des informations géométriques dans le but d'intégrer les informations, d'enrichir les descriptions de celles-ci et d'élargir l'exploitation des modèles résultants.

### **3. Avantages d'une norme de description**

Une norme définie une façon de faire qui offre plusieurs avantages.

#### **3.1 Indépendance face aux logiciels commerciaux**

Chaque logiciel a son propre format d'enregistrement des données géométriques. Dans la plupart des cas, les données géométriques brutes ne sont pas accessibles. Les transferts entre logiciels qui ne partagent pas les mêmes primitives entraînent inévitablement une perte de données et une dégradation de l'information. Par exemple, des faces caractérisant un objet sous un logiciel peut donner lieu à des lignes après transfert vers un autre logiciel.

Définir une norme de description indépendante de tout logiciel devient un objectif fondamental pour assurer une certaine pérennité de l'information. Ceci signifie que le format de données doit être commun, lisible par tous, récupérable dans toutes situations

pour être traité dans le logiciel souhaité. Le format alphanumérique répond à ces exigences.

### **3.2 Contrôle de qualité**

Il est fréquent de rencontrer des modèles numériques mal construits ou imprécis, ce qui restreint considérablement l'exploitation de l'information. Prenons l'exemple courant des polygones non fermés qui rendent impossible le simple calcul des surfaces délimitées. De multiples exemples de ce genre illustrent les difficultés engendrées par l'absence d'une norme de description susceptible de servir de balise à la construction des modèles.

De plus, les différences entre les pratiques de modélisation peuvent avoir des impacts importants sur le potentiel d'exploitation de l'information enregistrée. La qualité du résultat est dépendante de l'individu qui modélise. En conséquence une même modélisation réalisée par deux entreprises aura des différences incontrôlables au niveau qualitatif.

Une norme peut assurer une qualité uniforme et donc une indépendance vis-à-vis les fournisseurs de services. Bien entendu, la précision de la norme fixe le niveau général de performance du résultat escompté.

### **3.3 Optimisation**

Une autre conséquence de l'application d'une norme est la création d'un environnement propice à l'optimisation des possibilités d'exploitation de l'information. Le simple fait que l'information puisse être codée uniformément rend tout traitement, même complexe, applicable à l'ensemble de cette information.

### **3.4 Partage du travail**

L'application d'une norme rend possible le partage de tâches de travail. Le nombre de personnes participant à l'élaboration d'un modèle n'a plus d'effet sur la cohérence du résultat escompté parce que la norme assure la cohésion et la cohérence des travaux individuels.

## **4. Une nouvelle approche de modélisation**

*La norme de description repose sur une nouvelle manière d'aborder le processus de modélisation. D'une part, l'information décrite est enregistrée dans un format universel*

et compact. D'autre part, le traitement de cette information permet de générer une multitude de modèles plutôt que de décrire un résultat.

Cette distinction est fondamentale et bouleverse les manières de faire courantes. Avec un logiciel de CAO, on utilise les primitives géométriques disponibles pour construire les formes des objets du modèle. On peut disposer de représentations informatiques plus ou moins élaborées ou de règles de construction plus ou moins établies, il n'en demeure pas moins qu'avec ce processus de modélisation l'information décrite (géométrique et alphanumérique) correspond au résultat recherché (Figure 1). Malgré le fait qu'il soit possible d'extraire des attributs, des quantités, de procéder à des images de synthèse ou à des animations, l'exploitation demeure limitée.

L'approche adoptée (Figure 2) mène à la mise en place d'une base d'informations, décrite en format alphanumérique, et des procédures de traitement nécessaires à l'exploitation de ces informations. Une multitude de produits peuvent résulter du traitement de l'information; un modèle 3D comportant différentes qualités et attributs, un profil de rue, etc.

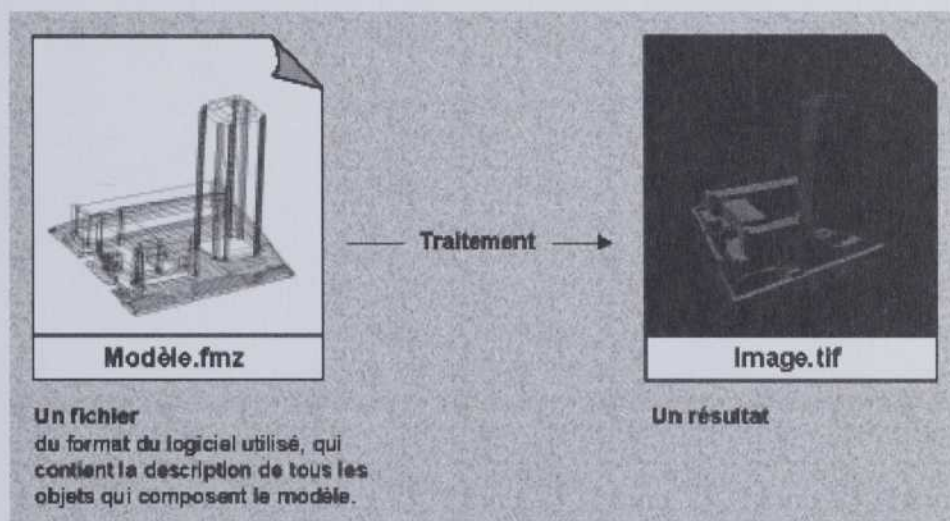


Figure 1. L'approche courante

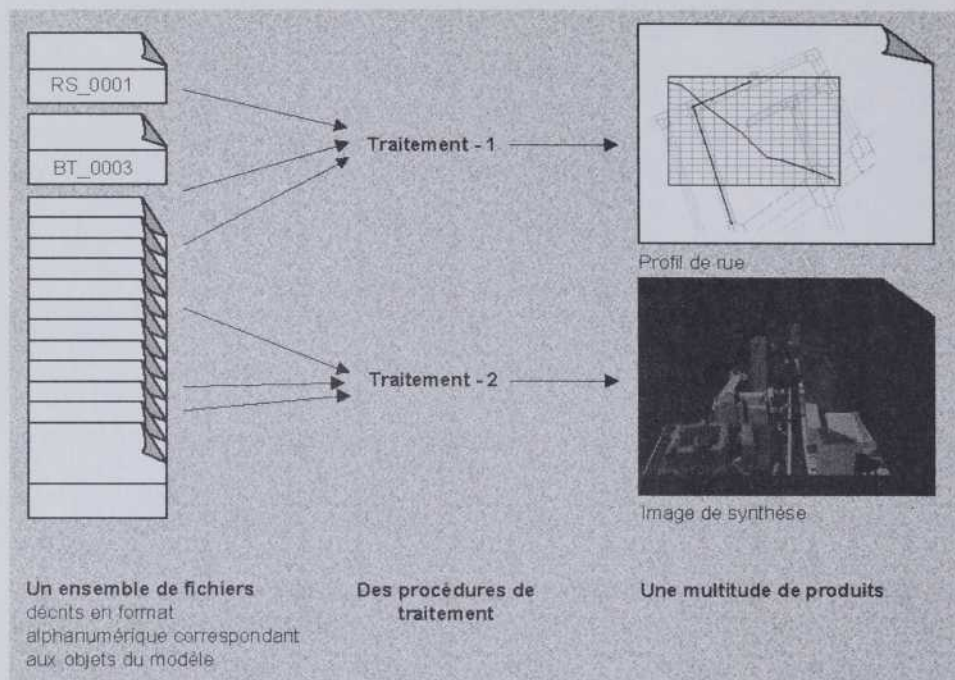


Figure 2. L'approche proposée

#### 4.1 Le format de description des informations

Une description de type texte, respectant des règles d'écriture précises, permet de sauvegarder et de récupérer l'information tout en la rendant universellement accessible à tous.

#### 4.2 L'interpolation géométrique et logique

La constitution d'un modèle, et encore plus celle d'une norme, pose la question du niveau de précision. L'information disponible pour constituer un modèle numérique, indépendamment du mode de saisie de ces données, a une précision limitée. Il est possible d'interpoler des données pour en obtenir de plus fines, mais celles-ci ne seront pas significatives et une interpolation trop poussée surcharge les modèles résultants et la mémoire nécessaire au traitement de ceux-ci tout en donnant « l'illusion » de la précision.

Par contre, les données disponibles ne sont pas toujours suffisantes pour déterminer une forme spécifique, il est souvent nécessaire d'interpréter le manque d'information. Une approche pour compléter l'information disponible peut nécessiter l'énoncé de règles de conception qui indiquent comment déduire logiquement une information manquante en fonction des situations spécifiques. Par exemple, dans le cas de la modélisation du sous-sol d'un bâtiment dont on connaît le nombre de niveaux sans connaître ni la forme ni la hauteur, il est possible de supposer que l'implantation correspondra au périmètre hors terre alors que la hauteur devrait voisiner les 2.5 mètres courant d'un étage classique. Tout en différant de la réalité, cette hypothèse peut cependant représenter la meilleure interprétation possible.

Il est nécessaire de distinguer les informations provenant d'un relevé, de celles évaluées ou interprétées et susceptibles de changer. Aussi, la norme doit faire état des données réelles, des procédures d'interpolation et des données qui sont dérivées au moyen de ces procédures.

#### **4.3 Le découpage par objet**

Toute organisation de l'information implique le découpage de la réalité en objets indépendants. Ce découpage est défini selon l'exploitation prévue pour cette information et la structure du système décrit. La quasi totalité des modèles sont découpés par catégorie en utilisant le potentiel des couches, fonction courante des logiciels de CAO. Cette approche permet de filtrer l'information relative à une catégorie particulière mais ne permet pas d'identifier un objet spécifique, ni ses relations avec d'autres objets. Une approche menant à une sélection intelligente de l'information est celle qui considère chaque élément et ses relations avec l'environnement comme faisant l'objet d'une description indépendante et d'un enregistrement repérable, susceptibles d'être sélectionnés selon ce qui le caractérise. Cette approche est similaire à celle que l'on retrouve dans une base de données.

Dans la maquette étudiée, nous avons remarqué un découpage arbitraire du réseau routier résultant de la superposition de cartes. On note le changement de direction et de densité des polygones à la limite des deux fichiers.

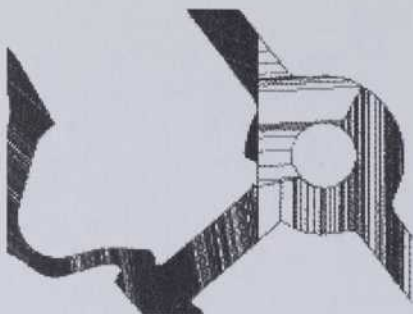


Figure 3. Effet de bordure de carte sur la représentation d'une rue

Dans le cadre du présent projet, nous avons distingué les objets suivants :

#### 4.3.1 Le réseau routier

Le réseau routier est constitué de voies de circulation. Celles-ci sont articulées autour d'intersections et de tronçons ou segments de rue. Cette articulation permet de limiter la représentation d'une rue à la partie comprise entre deux carrefours. Elle permet aussi de refléter l'appartenance d'une intersection à plusieurs rues sans créer de redondance dans la description de l'information.

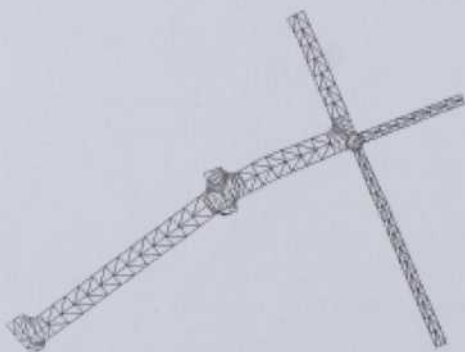


Figure 4. Nouvelle articulation du réseau routier

À chaque intersection ou tronçon sont assignées les qualités suivantes :

- la géométrie de la surface de roulement (intersections et tronçons)
- la géométrie des trottoirs
- la géométrie des réseaux souterrains (aqueduc, gaz, électricité, égouts)
- la géométrie des couches géologiques
- le nom de la rue
- une date de création et une date de disparition assignée à chaque description géométrique
- un numéro permettant de pointer vers diverses bases de données pouvant par exemple contenir des informations relatives à l'entretien ou la construction de cette partie du réseau.

#### 4.3.2 Les îlots

Les îlots sont les portions de terrain entourés de rues. Ils contiennent des lots, délimités par le cadastre. Dans le modèle actuel, la divergence importante constatée entre les données des cartes du cadastre et celles du modèle numérique ne nous a pas permis de réaliser un découpage des îlots en lots sans que cela ne soulève d'importants problèmes de précision. Le découpage en lot permet, entre autre, de référer à la propriété ainsi qu'aux règlements municipaux. Dans un premier temps, nous avons donc choisi de traiter les îlots comme des lots.

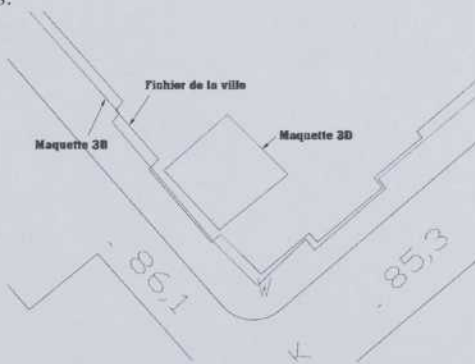


Figure 5. Le coin sud du parlement. On voit que les deux informations ne coïncident pas et que la tour sud est carrément déformée.

À chaque lot sont assignées les qualités suivantes :

- la géométrie de la surface du sol;
- la géométrie des couches géologiques;
- la géométrie des bâtiments;
- la géométrie des aménagements extérieurs;

- la végétation;
- un numéro de pointeur sur de potentielles bases de données.

#### 4.3.3 *La surface du sol*

La surface du sol correspond à l'aménagement paysager autour des bâtiments (avant-cour, arrière-cours, aménagements paysagers divers).

À chaque terrain sont assignées les qualités suivantes :

- la topographie (forme et niveaux);
- les aménagements extérieurs (sentiers, entrées de garage, kiosques, services, travaux de soutènement, etc.);
- une date de création et une date de disparition assignée à la description géométrique.

#### 4.3.4 *Les bâtiments*

Les bâtiments sont les parties construites sur les lots. Étant donné le manque d'information, nous avons décrit les bâtiments en deux parties, hors sol et sous-sol.

À chaque bâtiment sont assignées les qualités suivantes:

- la géométrie du sous-sol (en dessous du rez-de-chaussée);
- la géométrie de la partie hors sol (au-dessus du rez-de-chaussée);
- le nom du bâtiment, s'il y a lieu;
- une date de création et une date de disparition assignée à chaque description géométrique
- un numéro de pointeur (ou le numéro civique) susceptible d'être associé à diverses bases de données.

Il est important que le découpage des bâtiments soit fait sur celui des numéros civiques de façon à pouvoir les raccorder aux informations relatives aux propriétaires. On distingue ainsi les maisons en rangée selon les murs mitoyens. Le découpage peut également être effectué selon la verticale comme dans le cas de condominium (cadastre tridimensionnel).

#### 4.3.5 *La végétation*

La végétation comprend principalement les arbres. Comme beaucoup de villes gèrent l'état de son patrimoine forestier, la description des arbres doit être individuelle. .

À chaque arbre sont assignées les qualités suivantes:

- un point de localisation;
- un numéro d'identification ou pointeur vers des bases de données;
- une date de plantation et une date de disparition.

### 4.3.6 Les trottoirs

Les trottoirs sont associés à la circulation et donc aux rues. Ils sont généralement entièrement du domaine public. Ils doivent donc rencontrer le même type de découpage que le réseau routier. Cependant, en raison des différences entre les données du cadastre et celles de la maquette, nous avons associé les trottoirs à l'îlot.

## 4.4 L'organisation des informations

### 4.4.1 La hiérarchie

L'ensemble des objets ainsi définis doivent être organisés selon une certaine hiérarchie. Certains objets sont à caractère strictement logique et représentent des catégories alors que d'autres sont physiques et représentent des formes particulières.

Chaque objet, logique ou physique, sera donc référencé à son niveau supérieur de façon à constituer un arbre hiérarchique. Ainsi, on peut aisément sélectionner un objet ou l'ensemble des objets de même niveau (tout le réseau routier d'un quartier par exemple) ou tous les objets dépendants d'un niveau donné (toute l'information sur un îlot par exemple).

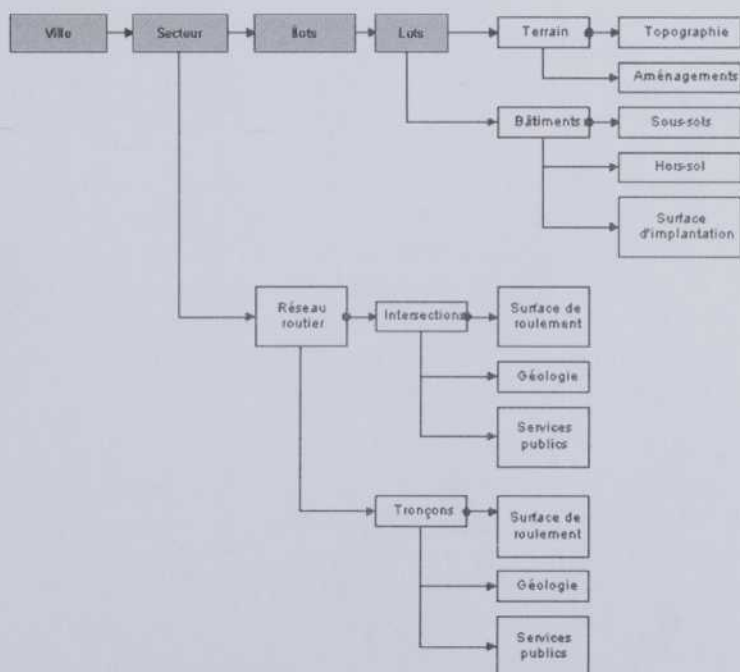


Tableau 1. Organisation de la hiérarchie des objets (en gris, les objets strictement logiques)

#### 4.4.2 Le repérage

Chaque objet comporte une description spécifique et doit être localisé par rapport à l'ensemble. De façon à faciliter la manipulation et le traitement des composantes du modèle, chaque objet, physique ou logique, a son propre système de coordonnées tridimensionnel. Celui-ci est constitué d'une origine défini au centre d'un hexaèdre droit qui enveloppe parfaitement l'objet. Ainsi, chaque objet est localisé par rapport au niveau hiérarchique supérieur auquel il réfère par une valeur de translation de son origine par rapport à l'origine de ce niveau supérieur.

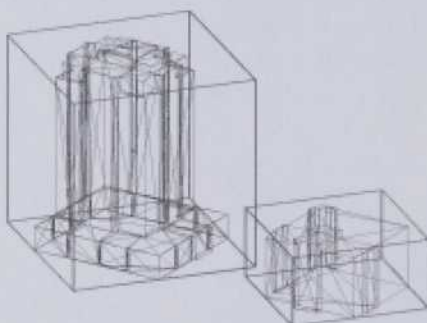


Figure 6. l'enveloppe représentant les minima et maxima des objets.

La définition de cette enveloppe offre plusieurs avantages. Il est possible de travailler sur chaque objet dans un système de coordonnées local ce qui permet de distribuer facilement le travail de modélisation sans référence à l'ensemble du modèle. On peut également définir une zone d'étude et sélectionner l'ensemble des objets partiellement ou totalement à l'intérieur de cette zone. Enfin, on peut définir un niveau hiérarchique ultime de coordonnées terrestres mondiales qui localisent chaque objet dans ce système de repérage international.

#### 4.4.3 Les adjacences

Chaque objet entretient des relations privilégiées avec les objets voisins immédiats, indépendamment de tout système hiérarchique. Ainsi, une intersection est directement adjacente à certains tronçons de rues qui sont, à leur tour, adjacents à d'autres intersections ou tronçons de rues. L'ensemble de ces liens de proximité dans l'espace forme un graphe général d'adjacences nécessaires à un traitement intelligent de l'information.

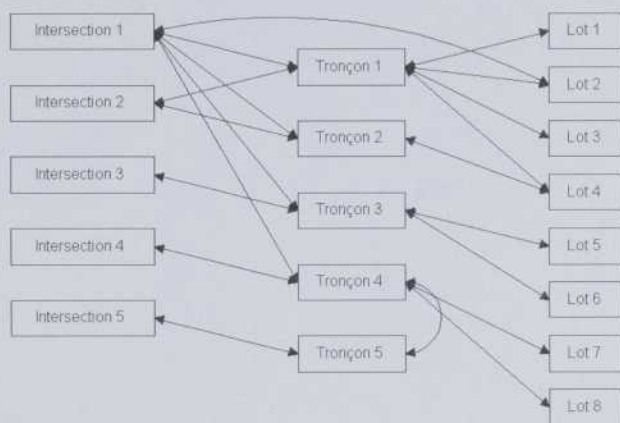


Tableau 2. Exemple de relation d'adjacences entre les intersections, les tronçons et les lots

#### 4.5 La représentation des objets

Dans le cadre de la norme proposée, chaque objet doit être représenté et donc modélisé d'une façon systématique afin de permettre un traitement général de l'information. Cela représente un format qui peut être particulier pour chaque objet mais une obligation de précision dans les jonctions entre les objets.

##### 4.5.1 Le réseau routier

Chaque partie du réseau peut comporter un niveau de détail très varié comme on peut le constater en figures 7 et 8. Notre objectif est de parvenir à une forme précise quel que soit le cas. La figure 8 représente une situation typique où l'on doit pallier à un manque d'informations par des procédures d'interprétation. Dans un premier temps, nous avons défini des procédures simples qui reflètent la construction d'une rue.

- une rue est construite par rapport à une ligne centre de circulation;
- sa pente est déterminée par celle de cette ligne centre;
- le profil transversal est horizontal;
- la largeur peut être variable pour un même tronçon.

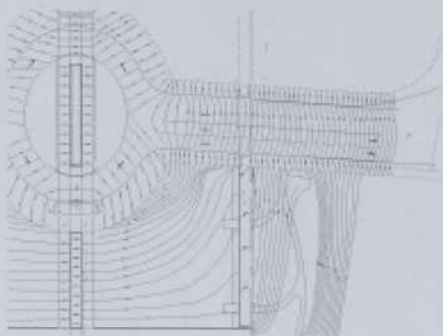


Figure 7. Données détaillées (courbes de niveau)



Figure 8. Données limitées (points géodésiques)

On peut ainsi décrire un tronçon de rue par 3 lignes 3D représentant le centre et les deux bordures latérales. Ces 3 lignes doivent avoir le même nombre de sommets, ce qui permet une construction automatique des faces qui définissent la surface entre ces 3 lignes.

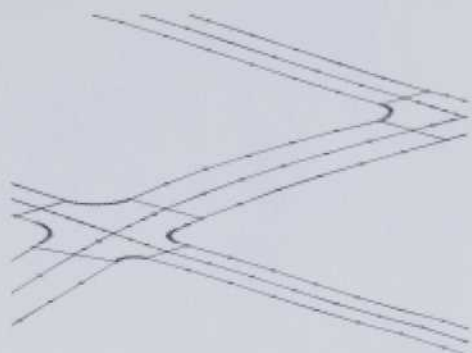


Figure 9. Lignes centre et latérales

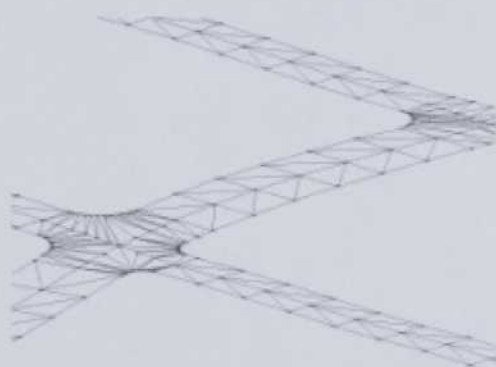


Figure 10. Génération des surfaces triangulées

Pour répondre à la grande variété de configurations possibles, il est possible de décrire une intersection par un nombre indéterminé d'ensembles de 3 lignes. Voici quelques exemples.



Figure 11. Intersection à 5 ensembles

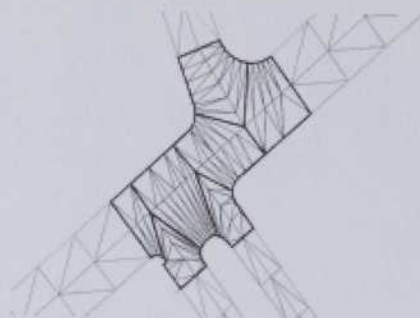


Figure 12. Intersection à 7 ensembles ou 2 intersections

#### 4.5.2 Le terrain

Dans la plupart des modèles, le sol urbain est traité comme un terrain naturel, pourtant dans les espaces urbanisés, le sol a été entièrement remodelé et obéit à des règles de construction formelles identiques à celles qui s'appliquent aux bâtiments. On retrouve des terrasses aplanies, des remblais et des murets.

Pour les terrains naturels, les données nous parviennent sous la forme de courbes de niveaux ou de points géodésiques. Dans ce cas, il convient de reconstituer la surface par interpolation entre les points sous la forme d'un maillage ou d'une triangulation. Cette approche produit des modèles verbeux et il est préférable de distinguer ces deux types de terrain.

Les limites du terrain doivent s'ajuster parfaitement aux pourtours des objets adjacents qui sont généralement les trottoirs et les bâtiments. Dans le modèle à l'étude, nous avons reconstruit la jonction entre les surfaces de terrains et les surfaces de trottoirs. De plus, nous avons percé le sol par le volume du sous-sol des bâtiments de façon à définir une intersection et une différenciation de la nature des objets modélisés.

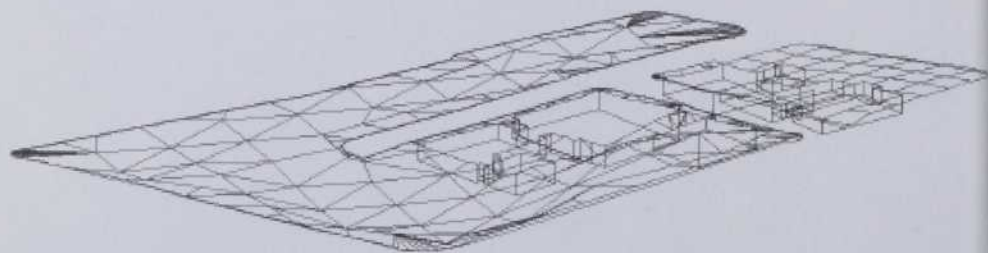


Figure 13. Percée du sol par les sous-sol des bâtiments

#### 4.5.3 Les bâtiments

Les données sur les bâtiments sont, en règle générale très limitées. On retrouve le pourtour d'implantation au sol et le nombre d'étages ou la hauteur du toit. La description tridimensionnelle sera donc, le plus souvent, réduite à celle d'un polygone extrudé. Des procédures simples permettront une interprétation tridimensionnelle du polygone d'implantation à partir des informations disponibles.

La description minimale comprend :

- le volume le plus précis possible du rez-de-chaussée jusqu'au toit;
- le volume de fondation du rez-de-chaussée jusqu'au plancher du sous-sol;
- la surface du rez-de-chaussée.

Dans le modèle à l'étude, l'absence d'informations précises, nous a mené à déterminer le niveau du rez-de-chaussée au point le plus haut du sol adjacent et à fixer la hauteur du sous-sol à 3 mètres. La définition du volume du sous-sol a été déduite de celle du rez-de-chaussée.

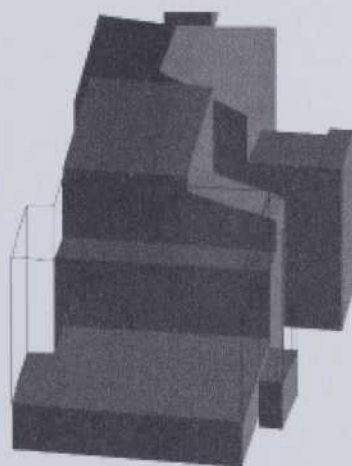


Figure 14. Modélisation d'un bâtiment

Les bâtiments ou autres ouvrages construits, peuvent inclure des formes courbes complexes qui avec plusieurs logiciels sont représentées par des facettes planes. Cette approche produit des modèles verbeux et entraîne la perte des paramètres de génération. Une stratégie à adopter consiste à enregistrer, comme pour les voies de circulation, les informations nécessaires pour construire la surface de l'objet et de référer sa construction en facettes à des procédures d'interprétation plutôt que de décrire le résultat de cette interprétation.

## 4.6 Format d'enregistrement

### 4.6.1 Principes généraux

Nous avons opté pour une description alphanumérique, universelle et indépendante de tout logiciel. Chaque objet est décrit dans un fichier spécifique qui comprend l'ensemble des informations nécessaires aux sélections particulières à une requête, aux traitements prévisibles et aux constructions graphiques possibles.

### 4.6.2 La dénomination des fichiers

Étant donné que chaque objet est représenté dans un fichier séparé, on peut s'attendre à avoir autant de fichiers qu'il y a d'objets distingués dans un modèle, c'est-à-dire des milliers. Distinguer ces fichiers, exige d'établir et de respecter une logique dans la dénomination. Nous avons adopté une dénomination constituée d'un préfixe pour le type d'objet considéré suivi d'un numéro de référence pour l'identifier. À titre d'exemple, les préfixes suivants ont été retenus :

- CC désignant l'ensemble de la zone d'intervention;
- IL désignant des îlots;
- BT désignant des bâtiments;
- ST désignant des sites ou terrains;
- VO désignant les voiries;
- TT désignant les trottoirs
- RU désignant les rues
- RI désignant les intersections de rues
- RS désignant les segments de rues

De la même façon, pour distinguer la nature des informations contenues dans chaque fichier, il est nécessaire de définir des extensions comme par exemple .dat pour le fichier de saisie d'un projet.

### 4.6.3 La saisie et l'enregistrement des données

Il est nécessaire de distinguer entre la saisie de données et leur enregistrement définitif. D'une part, il est important de constituer une base d'information organisée et précise tout en facilitant la tâche de l'opérateur qui fournit ou met à jour des données et d'autre part, il est nécessaire d'optimiser l'enregistrement des données en vue du traitement et de la communication de l'information. Nous avons constaté qu'il est plus performant que l'enregistrement d'un nouvel objet soit considéré comme une opération en soi. Nous avons donc adopté une stratégie basée sur la constitution d'un seul fichier (.dat) par objet pour la saisie de l'ensemble des informations nécessaires qui dans un deuxième temps, seront traitées, alimentant ainsi des fichiers générés en réponse aux différentes

requêtes. Un tel système exige de définir, dès le départ, l'exploitation souhaitée pour le modèle dans le but de procéder à l'identification précise des données nécessaires aux traitements des requêtes et la mise en place de procédures de saisie de données qui assure la disponibilité des informations.

Ainsi, lors de l'enregistrement dans un fichier (.dat) des données relatives à un tronçon de rue, par exemple, on notera :

- le nom de la rue auquel il appartient;
- son niveau hiérarchique;
- son histoire;
- sa translation vers le niveau hiérarchique supérieur;
- sa forme logique :
- le nombre d'ensembles qui déterminent sa forme logique et leur nature,
- la description de chaque ensemble logique et le nom de la procédure qui permet son traitement;
- sa forme physique brute :
- la description de chaque ensemble physique brut;
- ses relations d'adjacence.

*En conséquence chaque type d'objet a son propre format de saisie et sa propre structure d'enregistrement.*

#### 4.6.4 La mise à jour

L'approche adoptée permet d'optimiser l'enregistrement des données sans nuire à l'interface de saisie d'information. La saisie reste ponctuelle alors que l'enregistrement consiste à traiter cette saisie pour mettre à jour les divers types de fichiers requis pour un traitement ultérieur. Une mise à jour consistera à produire un nouveau fichier de saisie qui ne contient que les changements à apporter.

La mise à jour peut être lancée, comme fonction, à des périodes choisies et sur des sujets choisis. Ainsi la mise à jour des adjacences entraînera la mise à jour des fichiers d'adjacences sans affecter les autres informations. Le fichier de saisie sera donc réécrit avec cette information en moins, puisqu'elle a été traitée, jusqu'à mise à jour complète. On assure ainsi la cohérence du travail de mise à jour de plusieurs acteurs en parallèle.

La mise à jour pose le problème des raccords entre les informations. Ainsi, la modification de l'implantation d'un bâtiment implique celle du percement du terrain sur lequel il est situé. Il faut développer des processus de traitements des mises à jour de façon à conserver la cohérence de l'ensemble. Cet aspect de la définition d'une norme n'a pas encore été étudiée bien que beaucoup de pistes soient possibles.

#### **4.7 Le traitement des données**

Les fichiers, décrits en format alphanumérique, doivent être transférés vers une structure organisée pour répondre rapidement aux diverses requêtes. Le traitement des informations et le transfert vers des logiciels spécifiques répondant aux besoins des utilisateurs sont réalisés par ce que l'on nomme un générateur de code. Celui-ci analyse la structure des objets et organise les informations (attributs, etc.) de façon à répondre aux différentes requêtes soumises pour finalement produire les données nécessaires aux logiciels. Par exemple, pour sélectionner l'ensemble des tronçons et intersections de rues entre deux intersections définies, il est nécessaire de disposer d'un fichier qui regroupe, par nom de rue, l'ensemble des objets qui la compose et ceci, dans l'ordre d'adjacence.

##### *4.7.1 Transfert vers les logiciels de CAO*

Étant donné que la description utilisée est indépendante de tout logiciel, il est possible de traduire cette description dans divers formats correspondant à des logiciels actuellement utilisés ou même à ceux qui seront développés. Ainsi, on dispose de fonctions qui traduisent les fichiers alphanumériques de description en entités surfaciques d'AUTO CAD, mais aussi en prismes volumiques de SGDL ou en quadriques générales selon les cas. Tant que l'information est normalisée et bien structurée, le transfert sous n'importe quelle forme, peut être totalement automatisé.

### **5. L'exploitation**

Les formats d'enregistrement, de traitement et de mise à jour de l'information sont déterminés par les exploitations souhaitées du modèle. Voici quelques exploitations possibles.

#### **5.1 Sélection intelligente des données**

Chaque objet est indépendant, représenté par un fichier de données spécifiques et caractérisé par des qualités qu'elles soient géométriques, historiques, topologiques ou provenant de bases de données diverses. On peut donc appliquer tous les filtres correspondant à une requête de sélection selon les besoins et générer le modèle correspondant à cette sélection comme on le fait avec les bases de données courantes pour des fins de décision ou information. Avec une même base d'information, un très grand nombre de modèles peuvent être générés.

## 5.2 Mémoire des événements

Il est possible de qualifier chaque composante de l'environnement par une date de construction et une date de démolition, que ce soit un bâtiment, un aménagement ou un terrain. Ainsi chaque objet décrit aura une forme définie dans le temps. Cette disposition permet facilement de mettre à jour l'évolution de la ville sans refaire l'ensemble du modèle. Elle permet surtout de conserver la mémoire de son évolution et de reconstituer sa forme à tout moment de son histoire.

## 5.3 Définitions variables

Il est possible de définir plusieurs niveaux de description pour chaque composante de l'environnement. Par exemple, le fichier A qui décrit un objet particulier comme le parlement de Québec, peut exister dans une version A1 qui construit une forme sommaire et simplifiée alors que la version A2 construira un modèle plus détaillée avec les ouvertures. Cette approche permet d'intégrer les études plus fines de certaines parties de la ville sans affecter la cohérence de l'ensemble. Elle permet surtout de gérer l'évolution du modèle numérique urbain d'une version approximative vers une version détaillée.

## 5.4 Applications particulières

Associée à un générateur de code, l'information normalisée peut être traitée et organisée de manière à profiter des possibilités algorithmiques de différentes catégories de logiciels. Voici une présentation succincte de quelques applications.

### 5.4.1 Visualisation

L'application la plus directe est celle pour laquelle la plupart des modèles sont conçus, c'est-à-dire la simulation visuelle présentée en images fixes ou animées.

### 5.4.2 Profil de rue

L'enregistrement des caractéristiques constructives des rues permet d'isoler la ligne centre de n'importe quel parcours et d'en tracer le profil vertical pour mettre en évidence les pentes, voir figure 2.

### 5.4.3 Recherche de trajets

De la même façon on peut déduire de la description des rues le réseau routier sous forme d'un graphe général. À partir de ce type de représentation, il est possible, par exemple, de déduire le plus court chemin entre deux intersections ou celui qui traverse le moins d'intersections. Ainsi, on répond aux besoins des ingénieurs civil, des ambulanciers ou des pompiers.

#### 5.4.4 *Gestion courante*

L'émergence d'un véritable SIURS 3D (Système d'Information Urbaine à Référence Spatiale) permet de représenter tout résultat d'un tri ou d'un filtre sur la base d'un ensemble de critères au choix comme la sélection d'objets répondant à des caractéristiques socioculturelles, financières, historiques ou plus simplement à des besoins d'entretien des infrastructures.

- Rapport d'occupation du sol

L'ajustement du format de description à des besoins d'analyse spécifique permet, entre autre, d'extraire le pourcentage d'occupation au sol des immeubles par rapport au terrain.

- Infrastructure du sous-sol et archéologie

Les infrastructures souterraines, enfouis dans le sol, comme le réseau d'égout ou d'aqueduc peuvent être facilement représentées par un modèle volumique sans avoir à trouser le sol autour de ces infrastructures. Dans ce cas, l'extraction des données surfaciques est assurée par la description des objets enfouis alors que leur impact sur la forme résultant du sous-sol l'est par une représentation volumique.

#### 5.4.5 *Simulation physique (air/sol)*

Une représentation volumique permet d'extraire les données nécessaires à l'application des algorithmes de simulation physique par le biais d'un maillage de la forme de la matière. Ainsi, on peut définir, en volume, la forme de l'air qui entoure la ville jusqu'à la couche limite, discrétiser ce volume en Voxels ou sur une autre base, et instruire les logiciels d'analyse de thermodynamique pour simuler l'effet des vents autour des bâtiments. De même, il est possible d'illustrer la forme des couches géologiques d'un site et assurer la possibilité de simuler les risques de glissement de terrain.

#### 5.4.6 *Règlement municipaux*

*Les objets étant définis logiquement, on peut, dans plusieurs situations, construire des volumes adaptés aux conditions décrites et illustrant l'application d'une ou de plusieurs règles selon une procédure déterminée. Cette possibilité ouvre la porte à la visualisation automatique de l'impact de règlements municipaux sur le profil urbain ou à la vérification partielle de la conformité d'une proposition de développement aux règlements applicables.*

## **6. Conclusion**

Les travaux de modélisation de la colline parlementaire de la Ville de Québec nous ont permis d'esquisser les fondements des règles de description et des formats d'enregistrement qui définissent une norme pour la modélisation et l'exploitation d'un modèle numérique d'un environnement physique urbain. Une version plus élaborée de cette nouvelle approche de modélisation devra être développée et évaluée avec le support des usagers potentiels pour nous assurer que les modèles répondent adéquatement à un maximum de besoins. Toutefois, il ressort des résultats préliminaires obtenus que l'établissement de cette norme est une solution permettant d'assurer une pérennité à l'information urbaine et un cadre d'intégration des données pour informer efficacement la prise de décision des responsables de l'aménagement.

F  
C

A  
B  
L

a

P

d

d

c

d

c

L

m

S

m

r

D

f

u

d

u

d

c

u

S

u

u

## Formes pascaliennes

### Géométrie descriptive des formes gauches : éléments

**Alain Marty**

*Ingénieur ecl architecte dplg enseignant ealr, École d'architecture Languedoc-Rousillon  
Montpellier, France*

*alain.marty@wanadoo.fr*

**Préambule.** *Au delà des formes élémentaires de la géométrie classique il n'y avait rien de facilement manipulable avant l'arrivée des outils informatiques. Les mathématiciens des siècles derniers avaient bien balisé la géométrie de belles formules différentielles complexes mais celles-ci restaient hors du champ d'application d'une géométrie descriptive autorisant le dessin à l'aide d'outils simples comme la règle et le compas ou comme guide du dessin à main levée.*

*L'informatique, dans ses applications de l'infographie et de la CAO, a mis en lumière une nouvelle famille de formes gauches très pratiques à manipuler sur l'écran (Béziers, Splines, Nurbs, Coons,...), mais échappant à toute compréhension directe et a fortiori manuelle, les algorithmes développés dans une littérature imposante et parfois indigeste restant complexes ou tout simplement cachés au fond des boîtes noires logicielles.*

*De Casteljau a proposé en 1959 un algorithme qui porte son nom, un algorithme récursif fondamental et étonnamment simple, une construction géométrique très intuitive menant à une puissante théorie. La présente étude en fait une application systématique à l'aide d'une poignée d'opérateurs géométriques élémentaires, et apporte quelques éléments à une géométrie descriptive de formes dites «pascaliennes» étendant les formes classiques de la géométrie aux nouvelles formes mises en lumière par l'informatique, tout en autorisant au final le dessin à main levée, avec un bout de corde comme unique guide...*

*Sont ainsi reconstruites les formes bien connues dites de «Bézier», par la simple utilisation de trois opérateurs géométriques:  $MI()$ ,  $MIR()$  et  $DIAG()$  initialement appliqués à un couple de points de l'espace euclidien puis à un nombre quelconque de ces*

formes; cette approche unitaire, intuitive et sans la moindre formulation analytique, permet d'aborder le cas de formes immergées dans d'autres formes gauches, et de construire aisément des formes plus complexes comme les Splines, les Nurbs, les Coons, à l'aide d'opérateurs de concaténation, de projection et de combinaisons linéaires. L'ensemble des formes pascaliennes muni de ces opérateurs constitue ainsi une géométrie descriptive, un outil apportant une aide à la compréhension directe et «manuelle» de formes dont l'expression analytique est souvent complexe, et un outil pouvant accompagner l'exploration de formes inédites jusque dans des dimensions supérieures.

L'exposé qui suit est divisé en cinq parties:

- 1) définition des opérateurs  $MI()$  et  $MIR()$
- 2) définition de l'opérateur  $DIAG()$
- 3) étude de formes immergées
- 4) étude de compositions de formes
- 5) implémentation d'une classe  $FORM$  en  $JAVA$

## Introduction

On se propose de construire à partir d'un ensemble de points une famille de formes (courbes, surfaces, volumes, hypervolumes, ...) engendrées initialement par l'application récursive d'une opération simple:

«construire le milieu de deux points».

### Petit rappel sur les points

L'espace de référence est l'espace euclidien peuplé de points que l'on souhaite pouvoir combiner suivant une expression du type:

$$P = \sum k_i \cdot P_i$$

Toutes les combinaisons linéaires de points ne sont pas valables: la somme de deux points qui conduit à un point dépendant du choix du repère ne peut pas convenir; en revanche, la demi-somme de deux points produit un point invariant dans un changement de repère et est donc une combinaison linéaire pondérée valable. De manière générale, on peut montrer que toute combinaison linéaire valable satisfait à la condition:

$$\sum k_i = 1$$

Seront notamment correctes des expressions comme:

$$P = (P_0 + P_1) / 2$$

$$P = 2.P_0 - P_1$$

$$P = (2.P_0 + P_1) / 3$$

$$P = (P_0 + 3.P_1 + 3.P_2 + P_3) / 8$$

$$P \text{ au milieu} \quad P_0P = PP_1$$

$$P \text{ symétrique} \quad PP_0 = P_0P_1$$

$$P \text{ au tiers} \quad P_0P = P_0P_1/3$$

... more later...

### À la recherche du milieu

Construisons le milieu de deux points en évitant la règle ou le compas. Sur un sol bien plat par exemple, une méthode est de tendre une corde entre deux piquets, de tracer avec une craie le segment de droite passant par ces deux piquets, puis de ramener la seconde extrémité de la corde sur la première en suivant la trace laissée par la craie, repliant ainsi la corde en deux parts égales dont la nouvelle extrémité se trouve au milieu du segment. Remarquer que sur le sol ou le tableau plan de la classe la corde tendue est bien une droite. Sur la surface gauche d'un champ vallonné, la corde correctement tendue et appliquée sur le sol, suivrait une courbe gauche, peut-être une géodésique, chemin le plus court le long duquel la normale à la corde est confondue avec la normale à la surface. Dans les deux cas on fait l'hypothèse que la corde garde une longueur constante et est infiniment souple. Remarquons qu'en évitant la règle ou le compas, le principe de construction du point milieu reste valable, que le sol soit plat ou vallonné, et ceci sera le point de départ d'une généralisation des formes étudiées dans l'espace euclidien au cas d'espaces courbes.

Ces bases étant données, nous allons définir les trois opérateurs  $MI()$ ,  $MIR()$  et  $DIAG()$ .

## 1. Opérateurs MI ( ) et MIR( )

Nous allons construire une première famille de formes en appliquant récursivement la construction du milieu de deux points et en généralisant cette construction.

### 1.2 Le segment

Soient deux points P0, P1 et le point milieu de ces deux points:

$$P_m = (P_0 + P_1)/2 \quad \text{noter que } k_0 = 1/2, k_1 = 1/2 \text{ et } \sum k_i = 1$$

que l'on conviendra d'écrire en utilisant l'opérateur MI():

$$P_m = \text{MI}(P_0, P_1)$$

Ce troisième point Pm donne naissance à deux couples de points (P0, Pm) et (Pm, P1), et à l'irrésistible envie de recommencer en direction de P0 et de P1:

$$P_{0m} = \text{MI}(P_0, P_m)$$

$$P_{00m} = \text{MI}(P_0, P_{0m})$$

$$P_{0mm} = \text{MI}(P_{0m}, P_m)$$

etc...

$$P_{m1} = \text{MI}(P_m, P_1)$$

$$P_{m11} = \text{MI}(P_m, P_{m1})$$

$$P_{m111} = \text{MI}(P_{m1}, P_1)$$

etc...

L'application récursive de cet opérateur conduit à une suite infinie et continue (cf §46) de points situés «entre» les deux points P0 et P1, que nous appellerons segment et noterons pL\_2 (les raisons de cette notation seront données plus loin). Nous noterons MIR() l'opérateur créant ce segment:

$$pL_2 = \text{MIR}(P_0, P_1)$$

### 1.3 La facette gauche

Sur quatre points P00, P01, P10, P11 donnés, créons deux segments:

$$pL2_0 = \text{MIR}(P_{00}, P_{01})$$

$$pL2_1 = \text{MIR}(P_{10}, P_{11})$$

Considérons le segment pL2\_m construit sur le milieu des extrémités de pL2\_0 et pL2\_1:

$$pL2_m = \text{MIR}(q_0, q_1) \quad \text{avec: } q_0 = \text{MI}(P_{00}, P_{10})$$

$$q_1 = \text{MI}(P_{01}, P_{11})$$

Par analogie avec ce qui précède, généralisant ainsi le concept de milieu de deux points à celui de milieu de deux segments, nous conviendrons d'écrire:

$$pL2\_m = MI(pL2\_0, pL2\_1)$$

L'application récursive de cet opérateur conduit à une suite infinie et continue de segments situés «entre» les deux segments  $pL2\_0$  et  $pL2\_1$ , une portion de surface que nous appellerons «facette gauche» notée  $pS22$ . Nous noterons encore  $MIR()$  l'opérateur créant cette surface:

$$pS22 = MIR(pL2\_0, pL2\_1)$$

#### 1.4 Le cube gauche

Par analogie avec ce qui précède, la facette milieu de deux facettes  $pS22\_0$  et  $pS22\_1$  s'écrira:

$$pS22\_m = MI(pS22\_0, pS22\_1)$$

L'application récursive de l'opérateur  $MI()$  conduira à une suite infinie et continue de facettes situées «entre» les deux facettes  $pS22\_0$  et  $pS22\_1$ , un mille-feuilles gauche, un volume que nous appellerons «cube gauche» noté  $pV222$ . Nous noterons encore  $MIR()$  l'opérateur créant ce volume:

$$pV222 = MIR(pS22\_0, pS22\_1)$$

#### 1.5 Généralisation

La généralisation est immédiate aux formes de dimensions supérieures: deux cubes gauches engendrent un hypercube gauche, etc... Deux formes  $pF\_0$  et  $pF\_1$  étant données, l'opérateur  $MI()$  produit une forme  $pF\_m$  milieu et l'opérateur  $MIR()$  produit une forme de dimension supérieure. Nous allons voir que les opérateurs  $MI()$  et  $MIR()$  peuvent s'appliquer à plus de deux formes. Pour cela définissons le troisième opérateur  $DIAG()$ .

## 2. Opérateur DIAG()

L'opérateur DIAG() permet de créer de nouvelles formes par une sorte de contraction, de pliage ou de diagonalisation des formes initiales. Les nouvelles formes produites sont de dimension inférieure, mais de complexité (d'ordre, de degré) plus élevée. Nous étudierons les diagonalisations d'une facette gauche et d'un cube gauche.

### 2.1 Diagonalisation d'une facette gauche

Sur quatre points P00,P01,P10,P11 donnés, créons deux segments et une facette gauche:

$$\begin{aligned} pL2\_0 &= \text{MIR}(P00,P01) \\ pL2\_1 &= \text{MIR}(P10,P11) \\ pS22 &= \text{MIR}(pL2\_0,pL2\_1) \end{aligned}$$

et construisons le point milieu de la facette:

$$Pm = ( P00 + P01 + P10 + P11 )/4$$

En appliquant récursivement ce processus aux deux facettes en diagonale construites sur (P00,Pm) et (Pm,P11), on produit une série infinie et continue de points. Appelons DIAG() l'opérateur créant dans la facette cette ligne «diagonale» que nous conviendrons de noter pL3:

$$pL3 = \text{DIAG}(pS22)$$

Cet opérateur produisant une courbe dont la dimension est inférieure à celle de la facette, on est conduit à rechercher un ensemble réduit de points de «contrôle». En définissant les trois points:

$$\begin{aligned} P0 &= P00 \\ P1 &= (P01 + P10)/2 \\ P2 &= P11 \end{aligned}$$

on peut réécrire le milieu de la facette sous une nouvelle forme ne faisant intervenir que ces 3 points:

$$\begin{aligned} Pm &= ( P00 + P01 + P10 + P11 )/4 \\ &= ( P0 + 2.P1 + P2 )/4 \\ &= \text{MI}(P0,P1,P2) \end{aligned}$$

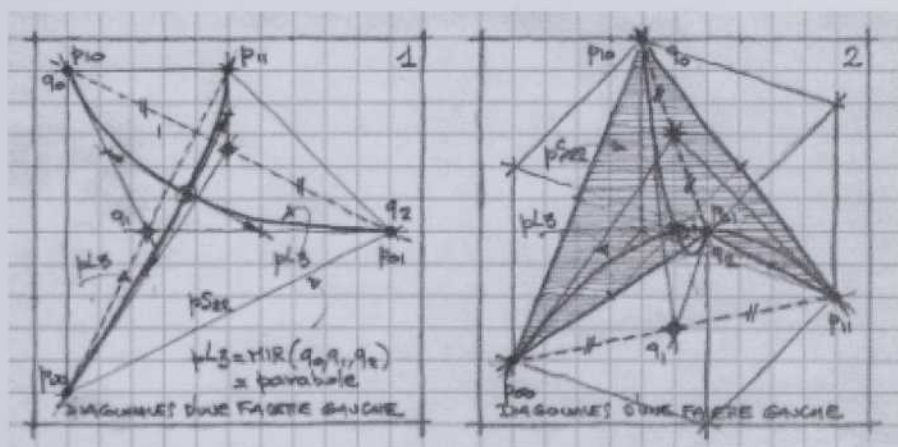
la dernière expression étendant le concept de milieu de deux points à celui de milieu de 3 points. De plus, en réécrivant  $P_m$  sous la forme:

$$\begin{aligned}
 P_m &= ((P_0+P_1)/2 + (P_1+P_2)/2)/2 \\
 &= MI( MI(P_0,P_1), MI(P_1,P_2) ) \\
 &= MI(q_0,q_1) \quad \text{avec} \quad q_0 = MI(P_0,P_1) \\
 & \quad \quad \quad q_1 = MI(P_1,P_2)
 \end{aligned}$$

on met en évidence le processus récursif aboutissant à  $P_m$  en deux étapes à partir des points  $P_0, P_1, P_2$ , ainsi que les triplets  $(P_0, q_0, P_m)$  et  $(P_m, q_1, P_2)$  auxquels on peut appliquer récursivement le même processus à gauche et à droite pour produire une suite infinie et continue de points «contrôlés» par  $(P_0, P_1, P_2)$ , une courbe connue sous le nom de parabole. Etendant encore la définition initiale de l'opérateur  $MIR()$ , on peut exprimer la diagonale trouvée plus haut sous une nouvelle forme:

$$pL3 = DIAG(pS22) = MIR(P_0, P_1, P_2)$$

On a ainsi retrouvé l'algorithme de de Casteljaou appliqué au cas de trois points, à partir du pliage d'une facette gauche, (cf fig 1 et 2).



## 2.2 Diagonalisation d'un cube gauche

La diagonalisation d'une facette produit une courbe, la diagonalisation d'un volume produira une surface et la diagonalisation de cette surface produira une courbe.

### 2.2.1 Cube gauche -> paraboloidé réglé

Sur quatre segments  $pL2\_00$ ,  $pL2\_01$ ,  $pL2\_10$ ,  $pL2\_11$  créons deux facettes gauches et un cube gauche:

$$pS22\_0 = \text{MIR}(pL2\_00, pL2\_01)$$

$$pS22\_1 = \text{MIR}(pL2\_10, pL2\_11)$$

$$pV222 = \text{MIR}(pS22\_0, pS22\_1)$$

De façon tout à fait similaire à ce qui a été fait pour la facette gauche, en montant simplement d'une dimension, le segment milieu du cube gauche peut s'écrire «symboliquement»:

$$pL2\_m = (pL2\_00 + pL2\_01 + pL2\_10 + pL2\_11) / 4$$

L'application récursive de ce processus aux cubes gauches en diagonale construits sur  $(pL2\_00, pL2\_m)$  et  $(pL2\_m, pL2\_11)$  produit une série infinie et continue de segments. Appelons encore  $\text{DIAG}()$  l'opérateur créant cette surface «diagonale» que nous conviendrons de noter  $pS32$ :

$$pS32 = \text{DIAG}(pV222)$$

Définissant les trois segments:

$$pL2\_0 = pL2\_00$$

$$pL2\_1 = (pL2\_01 + pL2\_10) / 2$$

$$pL2\_2 = pL2\_11$$

on peut écrire le segment milieu de la facette sous une nouvelle forme ne faisant intervenir que 3 segments:

$$\begin{aligned} pL2\_m &= (pL2\_00 + pL2\_01 + pL2\_10 + pL2\_11) / 4 \\ &= (pL2\_0 + 2 \cdot pL2\_1 + pL2\_2) / 4 \\ &= \text{MI}(pL2\_0, pL2\_1, pL2\_2) \end{aligned}$$

étendant ainsi le concept de milieu de deux segments à celui de milieu de trois segments.

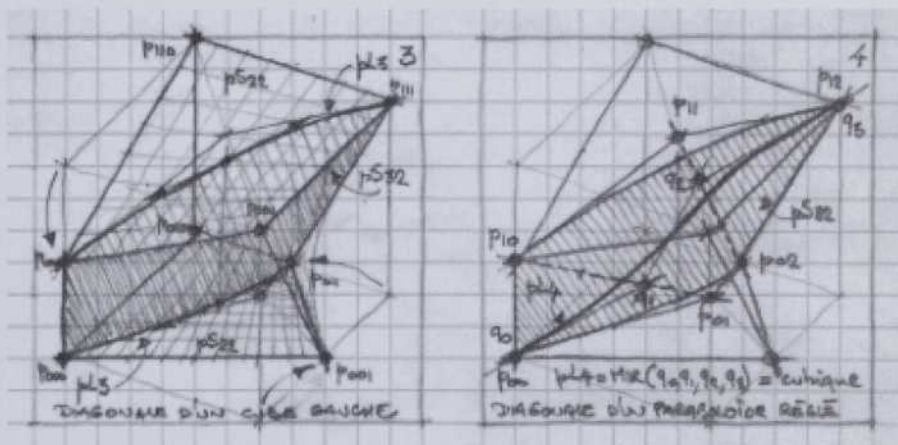
En réécrivant pL2\_m sous la forme:

$$\begin{aligned}
 pL2_m &= ((pL2_0+pL2_1)/2 + (pL2_1+pL2_2)/2) / 2 \\
 &= MI( MI(pL2_0,pL2_1), MI(pL2_1,pL2_2) ) \\
 &= MI(s0,s1) \qquad \text{avec: } s0 = MI(pL2_0,pL2_1) \\
 &\qquad \qquad \qquad s1 = MI(pL2_1,pL2_2)
 \end{aligned}$$

on met en évidence le processus récursif aboutissant à pL2\_m en deux étapes à partir des segments pL2\_0,pL2\_1,pL2\_2, ainsi que les triplets (pL2\_0,s0,pL2\_m) et (pL2\_m,s1,pL2\_2) auxquels on peut appliquer récursivement le même processus pour produire une suite infinie et continue de segments «contrôlés» par (pL2\_0,pL2\_1,pL2\_2), une surface appelée «paraboloïde réglé». Etendant encore la précédente définition de l'opérateur MIR(), on peut exprimer la diagonale trouvée plus haut sous une nouvelle forme:

$$pS32 = DIAG(pV222) = MIR(pL2_0,pL2_1,pL2_2)$$

Cette expression constitue une généralisation de l'algorithme de de Casteljau appliqué à 3 segments. (cf fig 3)



### 2.2.2 Paraboloïde réglé -> cubique

Soient P00,P10, P01,P11, P02,P12 les six points définissant les trois segments précédents pL2\_0, pL2\_1, pL2\_2 qui engendrant le paraboloïde réglé. Le point milieu de cette surface est le milieu du segment construit sur les milieux Pm0 et Pm1 des paraboles limites:

$$\begin{aligned} P_m &= (P_{m0} + P_{m1})/2 \\ &= ( (P_{00} + 2.P_{01} + P_{02})/4 + \\ &\quad (P_{10} + 2.P_{11} + P_{12})/4 )/2 \\ &= ( P_{00} + 2.P_{01} + P_{02} + P_{10} + 2.P_{11} + P_{12} )/8 \end{aligned}$$

En appliquant récursivement en diagonale ce processus aux deux paraboloïdes réglés construits sur (P00,Pm) et (Pm,P12), on produit une série infinie de points, une courbe connue sous le nom de cubique. Appelons DIAG() l'opérateur créant cette courbe «diagonale» que nous conviendrons de noter pL4:

$$pL4 = \text{DIAG}(pS32)$$

En définissant les points:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{00} \\ P_1 &= (2.P_{01} + P_{10})/3 \\ P_2 &= (P_{02} + 2.P_{11})/3 \\ P_3 &= P_{12} \end{aligned}$$

on peut écrire le point milieu du paraboloïde réglé sous la forme:

$$P_m = (P_1 + 3.P_1 + 3.P_2 + P_3) / 8$$

étendant encore le concept de milieu de deux et trois points à celui de milieu de 4 points:

$$P_m = \text{MI}(P_0, P_1, P_2, P_3)$$

Enfin en réécrivant  $P_m$  sous la forme:

$$\begin{aligned} P_m &= ( ( (P_0+P_1)/2 + (P_1+P_2)/2 )/2 + \\ &\quad ( (P_1+P_2)/2 + (P_2+P_3)/2 )/2 )/2 \\ &= MI( MI( MI(P_0,P_1), MI(P_1,P_2), \\ &\quad MI( MI(P_1,P_2), MI(P_2,P_3) ) ) ) \\ &= MI(r_0,r_1) \end{aligned}$$

avec:  $q_0 = MI(P_0,P_1)$   
 $q_1 = MI(P_1,P_2)$   
 $q_2 = MI(P_2,P_3)$   
 $r_0 = MI(q_0,q_1)$   
 $r_1 = MI(q_1,q_2)$

on met en évidence le processus récursif aboutissant à  $P_m$  en trois étapes à partir des points  $P_0,P_1,P_2,P_3$  ainsi que les quadruplets  $(P_0,q_1,r_0,P_m)$  et  $(P_m,r_1,q_1,P_3)$  auxquels on peut appliquer récursivement le même processus pour produire une suite infinie de points «contrôlés» par  $(P_0,P_1,P_2,P_3)$ . Etendant encore la précédente définition de l'opérateur  $MIR( )$ , on peut exprimer la diagonale trouvée plus haut sous une nouvelle forme:

$$pL_4 = DIAG(pS_{32}) = MIR(P_0,P_1,P_2,P_3)$$

On retrouve encore l'algorithme de de Casteljaou appliqué au cas de quatre points, à partir du pliage d'un paraboloïde réglé, (cf **figure 4**).

### 2.2.3 Cube gauche ->> cubique

On peut faire maintenant une autre approche plus compacte de la diagonalisation d'un cube gauche. En définissant deux facettes gauches  $pS_{22\_0}$  et  $pS_{22\_1}$ , le cube gauche s'écrit:

$$pV_{222} = MIR(pS_{22\_0},pS_{22\_1})$$

Soient  $pL_{3\_0}$  et  $pL_{3\_1}$  les diagonales de  $pS_{22\_0}$  et  $pS_{22\_1}$ :

$$\begin{aligned} pL_{3\_0} &= DIAG(pS_{22\_0}) \\ pL_{3\_1} &= DIAG(pS_{22\_1}) \end{aligned}$$

L'application de l'opérateur  $MIR()$  à ces deux paraboles produit une surface  $pS32$ , le parabolôide réglé:

$$pS32 = MIR(pL3_0, pL3_1)$$

et la diagonalisation de cette surface produit une courbe (cubique) qui s'écrit:

$$\begin{aligned} pL4 &= DIAG(pS32) \\ &= DIAG( MIR(pL3_0, pL3_1) ) \\ &= DIAG( MIR( DIAG(pS22_0), DIAG(pS22_1) ) ) \\ &= DIAG( DIAG( pV222 ) ) \\ &= DIAG^2( pV222 ) \end{aligned}$$

### 2.3 Généralisation

Partant du point milieu d'une facette gauche nous avons appliqué un processus récursif en diagonale et créé une parabole; partant du segment milieu d'un cube gauche nous avons appliqué le même processus récursif en diagonale et créé un parabolôide réglé; partant du point milieu du parabolôide réglé nous avons de même créé une cubique. Nous avons noté la correspondance entre ces diagonales et les formes produites par les opérateurs  $MI()$  et  $MIR()$  redéfinis pour s'appliquer à un nombre quelconque de formes, écriture nouvelle et généralisée de l'algorithme proposé par de Casteljaou en 1959.

Convenant toujours de noter une courbe  $pL$ , une surface  $pS$ , un volume  $pV$ , etc..., suivis d'indices précisant le nombre de formes génératrices, on a construit pour l'instant les formes:

$MIR( pP_0, pP_1 )$	-> $pL2$	segment
$MIR( pL2_0, pL2_1 )$	-> $pS22$	facette
$MIR( pS22_0, pS22_1 )$	-> $pV222$	cube
$MIR( pV222_0, pV222_1 )$	-> $pH2222$	hypercube
$DIAG( pS22 ) = MIR(pP_0, \dots, pP_2)$	-> $pL3$	parabole
$DIAG( pV222 ) = MIR(pL3_0, pL3_1)$	-> $pS32$	parabolôide réglé
$DIAG( pS32 ) = MIR(pP_0, \dots, pP_3)$	-> $pL4$	cubique

On va maintenant construire de façon plus systématique l'expression du point milieu des diagonales de différentes surfaces primitives, de la pS22 (facette gauche) à la pS44 (bicubique):

**pS22:**

$$\begin{aligned}
 pM &= MI( MI(p00,p01), \\
 &\quad MI(p10,p11) ) \\
 &= ((p00+p01)/2 + (p10+p11)/2 )/2 \\
 &= ( p00 + 2(p01+p10)/2 + p11 )/4 \\
 &= ( q0 + 2q1 + q2 )/4 \\
 &= MI( q0,q1,q2 )
 \end{aligned}$$

**pS32:**

$$\begin{aligned}
 pM &= MI( MI(p00,p01,p02), \\
 &\quad MI(p10,p11,p12) ) \\
 &= ((p00+2p01+p02)/4 + (p10+2p11+p12)/4 )/2 \\
 &= ( p00 + 3(2p01+p10)/3 + 3(p02+3p11)/3 + p12 )/8 \\
 &= ( q0 + 3q1 + 3q2 + q3 )/8 \\
 &= MI( q0,q1,q2,q3 )
 \end{aligned}$$

**pS33:** (cf figures 5 et 6)

$$\begin{aligned}
 pM &= MI( MI(p00,p01,p02), \\
 &\quad MI(p10,p11,p12), \\
 &\quad MI(p20,p21,p22) ) \\
 &= ( (p00+2p01+p02)/4 + 2(p10+2p11+p12)/4 + (p20+2p21+p22)/4 )/4 \\
 &= ( p00 + 4(p01+p10)/4 + 6(p02+4p11+p20)/6 + 4(p12+p21)/4 + p22 )/16 \\
 &= ( q0 + 4q1 + 6q2 + 4q3 + q4 )/16 \\
 &= MI( q0,q1,q2,q3,q4 )
 \end{aligned}$$

**pS42:**

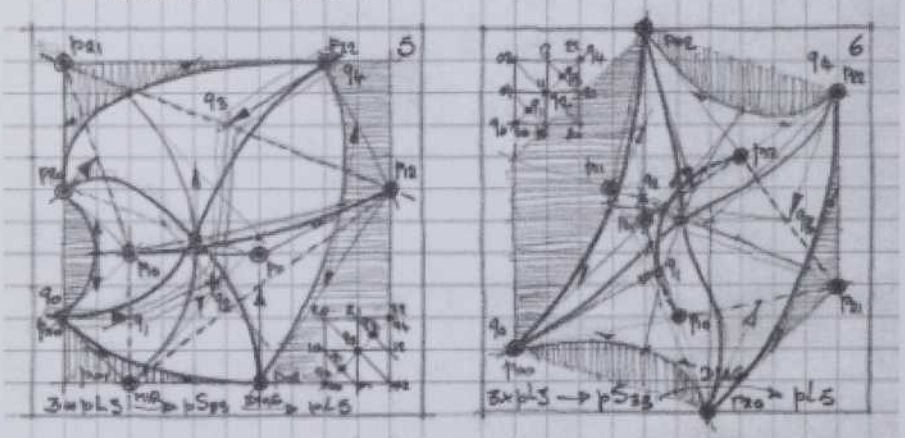
$$\begin{aligned}
 pM &= MI( MI(p00,p01,p02,p03), \\
 &\quad MI(p10,p11,p12,p13) ) \\
 &= ( (p00+3p01+3p02+p03)/8 + \\
 &\quad (p10+3p11+3p12+p13)/8 )/2 \\
 &= ( p00 + 4(3p01+p10)/4 + 6(3p02+3p11)/6 + 4(p03+3p12)/4 + p13 )/16 \\
 &= ( q0 + 4q1 + 6q2 + 4q3 + q4 )/16 \\
 &= MI( q0,q1,q2,q3,q4 )
 \end{aligned}$$

pS43:

$$\begin{aligned}
 p_M &= MI( MI(p_{00}, p_{01}, p_{02}, p_{03}), \\
 &\quad MI(p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}), \\
 &\quad MI(p_{20}, p_{21}, p_{22}, p_{23}) ) \\
 &= ( (p_{00} + 3p_{01} + 3p_{02} + p_{03})/8 + 2(p_{10} + 3p_{11} + 3p_{12} + p_{13})/8 + \\
 &\quad (p_{20} + 3p_{21} + 3p_{22} + p_{23})/8 )/4 \\
 &= ( p_{00} + 5(3p_{01} + 2p_{10})/5 + 10(3p_{02} + 6p_{11} + p_{20})/10 + \\
 &\quad 10(p_{03} + 6p_{12} + 3p_{21})/10 + 5(2p_{13} + 3p_{21})/5 + p_{23} )/32 \\
 &= ( q_0 + 5q_1 + 10q_2 + 10q_3 + 5q_4 + q_5 )/32 \\
 &= MI( q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 )
 \end{aligned}$$

pS44:

$$\begin{aligned}
 p_M &= MI( MI(p_{00}, p_{01}, p_{02}, p_{03}), \\
 &\quad MI(p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}), \\
 &\quad MI(p_{20}, p_{21}, p_{22}, p_{23}), \\
 &\quad MI(p_{30}, p_{31}, p_{32}, p_{33}) ) \\
 &= ( (p_{00} + 3p_{01} + 3p_{02} + p_{03})/8 + 3(p_{10} + 3p_{11} + 3p_{12} + p_{13})/8 + \\
 &\quad 3(p_{20} + 3p_{21} + 3p_{22} + p_{23})/8 + (p_{30} + 3p_{31} + 3p_{32} + p_{33})/8 )/8 \\
 &= ( p_{00} + 6(p_{01} + p_{10})/2 + 15(p_{02} + 3p_{11} + p_{20})/5 + \\
 &\quad 20(p_{03} + 9p_{12} + 9p_{21} + p_{30})/20 + \\
 &\quad 15(p_{13} + 3p_{22} + p_{31})/5 + 6(p_{23} + p_{32})/2 + p_{33} )/64 \\
 &= ( q_0 + 6q_1 + 15q_2 + 20q_3 + 15q_4 + 6q_5 + q_6 )/64 \\
 &= MI( q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6 )
 \end{aligned}$$



Nous pourrions étudier de la même façon des pSurfaces diagonales dans des pVolumes, et ainsi de suite... De façon générale, nous constatons que:

- 1) l'opérateur MI() produit une forme de même dimension,
- 2) l'opérateur MIR() produit une forme de dimension supérieure,
- 3) l'opérateur DIAG() produit une forme de dimension inférieure.
- 4) une forme milieu peut toujours s'écrire sous une forme explicite du type:

$$2 \text{ formes: } F_m = (F_0 + F_1)/2$$

$$3 \text{ formes: } F_m = (F_0 + 2.F_1 + F_2)/4$$

$$4 \text{ formes: } F_m = (F_0 + 3.F_1 + 3.F_2 + F_3)/8$$

$$5 \text{ formes: } F_m = (F_0 + 4.F_1 + 6.F_2 + 4.F_3 + F_4)/16$$

où l'on voit apparaître les coefficients du triangle de Pascal, conduisant à l'expression générale suivante pour le cas de n formes:

$$F_m = \mathbf{MI}(F_i) = \sum C_n^i \cdot F_i / 2^{(n-1)}$$

avec  $C_n^i = n!/(i! \cdot (n-i)!)$ , et  $i=[0,n]$

C'est pourquoi nous proposons pour cette famille de formes le nom de «**formes pascaliennes**», ou «**pFormes**» (avec les dérivés: pCourbe, pSurface, pVolume, etc..), la lettre 'p' rappelant le 'P' de Pascal, et le fait que ces formes sont toutes définissables à partir de points.

Remarque 1 : bien avant **Blaise Pascal**, philosophe et mathématicien français du XVIIème siècle, **Omar Khayyam**, poète et mathématicien iranien du XI/XIIème siècle et **Yanghui**, mathématicien chinois du XIIème siècle, avaient étudié les propriétés de ce triangle de nombres; on aurait donc pu appeler les pFormes des kFormes ou des yFormes, formes khayyamiennes ou yanghuiennes, mais c'est moins facile à prononcer pour un francophone.. :)

Remarque 2 : ces formes Pascaliennes ne sont pas nouvelles; la littérature classique en la matière parle de courbes et de surfaces de Bézier qui ont été étudiées sous toutes leurs coutures, et les approches en sont diverses: Bernstein a posé les bases mathématiques de l'interpolation de courbes, Bézier en a fait une approche algébrique/analytique construite sur les coefficients de Bernstein, de Casteljau en a davantage étudié le caractère géométrique et récursif. Les B\_splines, les NURBS, les carreaux de Coons et de Gordon en sont des extensions importantes.

Mais la présentation qu'on en fait souvent conduit à une forêt de notations et de définitions parfois obscures qui peuvent faire perdre le contact avec les choses simples, les propriétés fondamentales, les gestes primitifs. En choisissant de limiter l'approche à une poignée d'opérateurs géométriques élémentaires appliqués à un ensemble de points,

associée à une représentation matérielle qui peut être limitée à une simple corde pour tracer des segments et en trouver le milieu, on garde le contact avec les gestes simples du dessin à main levée, et on est naturellement conduit à aborder des formes appartenant à des espaces plus complexes, les formes immergées.

### 3. Formes immergées

Nous nous proposons maintenant d'explorer quelques courbes définies dans des pSurfaces, en établissant le rapport existant entre ces courbes et les pCourbes de l'espace contenant la pSurface et de tenter une généralisation à la définition de pFormes immergées.

#### 3.1 Un point sur une pSurface

La position d'un point sur une pSurface est donnée par l'intersection de deux génératrices divisant la pSurface en quatre sous-pSurfaces: sur une pS22 il s'agit de deux droites, sur une pS44 ce seront deux cubiques; dans tous les cas, un paramètre (nombre réel entre 0 et 1) suffit pour construire chaque génératrice. Sur une pS22 par exemple, la donnée des rapports 1/3 et 1/4 engendrera les génératrices:

$$\text{génératrice}_1 = \text{MIR}( (2.p00 + p01)/3 ), (2.p10 + p11)/3 ) )$$

$$\text{génératrice}_2 = \text{MIR}( (3.p00 + p10)/4 ), (3.p01 + p11)/4 ) )$$

dont l'intersection donnera le point cherché.

#### 3.2 Deux points sur une pSurface

Nous étudions d'abord le cas de la facette gauche.

Les génératrices passant par deux points quelconques distincts P0 et P1 d'une facette gauche définissent une sous-facette, faisant apparaître deux autres sommets «conjugués» de P0 et de P1. Définissons l'opérateur utilitaire MI\_CONJ(P0,P1) produisant le milieu des deux points conjugués. Par les deux points P0 et P1, on peut faire passer une courbe unique parfaitement définie par l'expression suivante:

$$pL3 = \text{MIR}( P0, \text{MI\_CONJ}(P0,P1), p1 )$$

Pour un «habitant» de l'espace, cette courbe est une parabole définie par 3 points, mais pour un «habitant» de la surface ignorant l'espace dans lequel cette surface est immergée, cette courbe passant par deux points P0 et P1 se comporte (cf remarque 2)

comme un segment de l'espace euclidien: ce segment immergé, noté «iSegment», est parfaitement défini par la donnée de deux points, et l'incrémentation récursive étant égale dans les deux directions, il coupe les génératrices suivant une «pente» constante par construction, il est «isocline».

Remarque 1 : sur cette base généralisée de segment, on pourrait étendre les concepts de parallélisme, d'orthogonalité, d'angle, étudier l'intersection de deux iSegments, ses divisions, ses prolongements, etc..., et définir ainsi une géométrie dans la facette gauche.

Remarque 3 : un iSegment n'est pas en général une géodésique, ce n'est pas le chemin le plus court entre deux points, la normale en chaque point de la courbe n'est pas confondue avec la normale à la surface en ce point. Mais il pourrait être intéressant de prendre les iSegments comme base pour l'étude et la construction des géodésiques d'une pSurface.

Remarque 3 : l'idée de considérer une parabole comme un simple segment immergé dans une facette gauche peut simplifier un problème difficile à traiter dans l'espace classique euclidien en le ramenant à un problème plus simple dans l'espace courbe défini par la facette.

Remarque 4: il existe une infinité de facettes admettant une parabole comme diagonale: P0,P1,P2 étant donnés, tous les couples de points q0 et q1 tels que P1 en soit le milieu conviennent.

Nous pouvons à présent étendre les opérateurs MI() et MIR() au cas d'une facette gauche, produisant respectivement un point et un iSegment appartenant de la facette, et écrire:

$$iP_m = MI(P_0, P_1) \quad \text{et} \quad iP_{L2} = MIR(P_0, P_1)$$

La généralisation est immédiate: ce que nous avons vu au § 22) nous permet de dire qu'une pL4 (cubique) peut être vue comme un iP<sub>L2</sub> (segment immergé) d'une pS<sub>32</sub> (paraboloïde réglé), ou/et d'un pV<sub>222</sub> (cube gauche); en passant à des formes immergées de dimensions supérieures, une pS<sub>32</sub> (paraboloïde réglé) peut être vue comme une iP<sub>S22</sub> (facette gauche) d'un pV<sub>222</sub> (cube gauche). Dans un pV<sub>222</sub> (cube gauche), l'opérateur MIR() appliqué à deux iP<sub>L2</sub> (pL4 ou cubiques de l'espace) produit une iP<sub>S22</sub> (pS<sub>44</sub> ou bicubique de l'espace); appliqué à deux iP<sub>S22</sub> l'opérateur MI() produira un iP<sub>V222</sub> (pV<sub>444</sub> ou cube gauche de l'espace à 64 points de contrôle).

Ainsi apparaît une généralisation au cas d'une pForme quelconque dans laquelle on peut manipuler des iSegments, des iFacettes, des iVolumes, etc... suivant la dimension de la pForme. Nous allons à présent étudier la possibilité d'«immerger» les pCourbes vues plus haut dans une pSurface. Et d'abord dans une facette gauche.

### 3.3 Trois points sur une facette gauche

Soient 3 points quelconques  $(P_0, P_1, P_2)$  appartenant à une facette gauche  $pS_{22}$ . On se propose d'étudier l'application à ces trois points des opérateurs  $MI()$  et  $MIR()$  conduisant respectivement au milieu des 3 points et à une  $p$ Courbe immergée, une  $ip$ Courbe. Nous allons étudier cette courbe du point de vue de l'espace contenant la facette et démontrer qu'il s'agit d'une  $p$ Courbe de l'espace.

Les points milieux des  $i$ Segments  $[P_0, P_1]$  et  $[P_1, P_2]$  s'écrivent:

$$\begin{aligned} q_0 &= (P_0 + 2.m_0 + P_1)/4 & \text{avec } m_0 &= MI\_CONJ(P_0, P_1) \\ q_1 &= (P_1 + 2.m_1 + P_2)/4 & \text{avec } m_1 &= MI\_CONJ(P_1, P_2) \end{aligned}$$

et le point milieu de la courbe cherchée sera le point milieu du  $i$ Segment  $[q_0, q_1]$ :

$$P_m = (q_0 + 2.m + q_1)/4, \quad \text{avec } m = MI\_CONJ(q_0, q_1)$$

Le point 'm' s'exprime en fonction de deux points mobiles,  $q_0$  et  $q_1$ , mais en remarquant que lorsque  $q_0$  (resp  $q_1$ ) se déplace sur le  $i$ Segment  $[P_0, P_1]$  (resp  $q_1$  sur  $[P_1, P_2]$ ),  $m$  se déplace sur une courbe  $[m_0, m_1]$  qui «doit» par homogénéité avec ce qui précède être un  $i$ Segment;  $m$  peut alors s'écrire en fonction des deux points fixes  $m_0$  et  $m_1$ :

$$m = (m_0 + 2.K + m_1)/4 \quad \text{avec } K = MI\_CONJ(m_0, m_1)$$

On peut alors écrire:

$$\begin{aligned} P_m &= (q_0 + 2.m + q_1)/4 \\ P_m &= ( (P_0 + 2.m_0 + P_1)/4 + \\ &\quad 2.(m_0 + 2.K + m_1)/4 + \\ &\quad (P_1 + 2.m_1 + P_2)/4 )/4 \\ P_m &= (P_0 + 4.m_0 + 2.P_1 + 8.K + 4.m_1 + P_2)/16 \\ P_m &= (P_0 + 4.m_0 + 6.Q + 4.m_1 + P_2)/16 \end{aligned}$$

en posant:  $Q = (P_1 + 2.K)/3$

exprimant  $P_m$  comme milieu de cinq points  $(P_0, m_0, Q, m_1, P_2)$ :

$$P_m = MI(P_0, m_0, Q, m_1, P_2)$$

En somme la courbe immergée construite sur trois points appartenant à une pS22 (facette gauche):

$$ipL3 = MIR(P0,P1,P2)$$

est une pCourbe de l'espace construite sur 5 points:

$$pL5 = MIR(P0,m0,Q,m1,P2)$$

avec  $m0 = MI\_CONJ(P0,P1)$

$$m1 = MI\_CONJ(P1,P2)$$

$$Q = (P1 + 2.MI\_CONJ(m0, m1))/3$$

### 3.4 Quatre points sur une facette gauche

En reprenant le raisonnement précédent appliqué à 4 points quelconques (P0,P1,P2,P3) appartenant à la facette gauche pS22, on démontre que la cubique immergée:

$$ipL4 = MIR(P0,P1,P2,P3)$$

est une pCourbe de l'espace construite sur 7 points: (cf figure 7)

$$pL7 = MIR(P0,m0,Q1,Q2,Q3,m2,P3)$$

avec  $m0 = MI\_CONJ(P0,P1)$

$$m1 = MI\_CONJ(P1,P2)$$

$$m2 = MI\_CONJ(P2,P3)$$

$$K0 = MI\_CONJ(m0, m1)$$

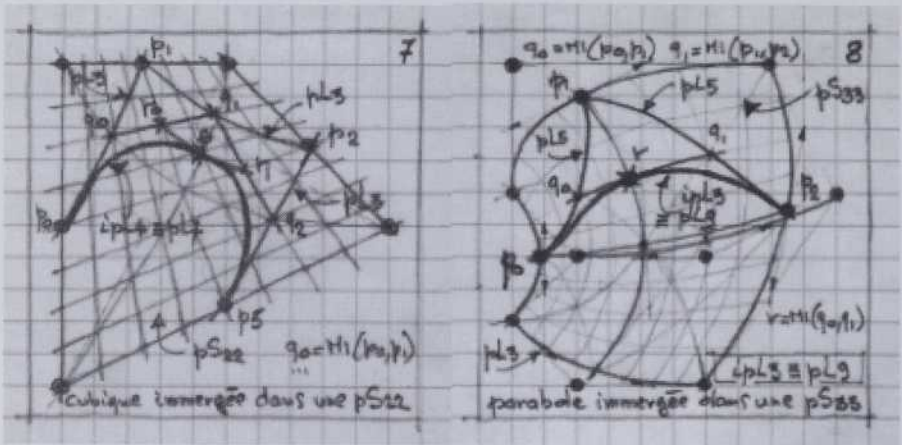
$$K1 = MI\_CONJ(m1, m2)$$

$$Q = (P1 + 2.MI\_CONJ(m0, m1))/3$$

$$Q1 = (P1 + 8.K0 + 6.Q)/15$$

$$Q2 = (8.m1 + 12.Q)/20$$

$$Q3 = (6.Q + 8.K1 + P2)/15$$



### 3.5 Généralisation : les pFormes immergées

Appliqués à plusieurs points appartenant à une facette, les opérateurs MI() et MIR() conduisent bien à des pCourbes de l'espace euclidien. Une courbe ipLN construite sur N points immergée dans une pSurface peut être vue comme une pLM de l'espace contenant la surface. De plus, ce qui vient d'être dit pour une pSurface peut être encore généralisé à toutes les pFormes. Deux points étant donnés dans un pV222 (cube gauche), on peut définir un ipL2 (segment immergé) reliant ces deux points, une ipL3 (parabole immergée), une ipL4 (cubique immergée) et au delà construire des ipLN construite sur N points, vues comme des pLM (pCourbes) de l'espace contenant le pV222 (cube gauche).

De façon générale une pCourbe ipLN immergée dans une pForme de dimension  $d$  :  $pF_{m_1 m_2 m_3 \dots m_d}$ , est équivalente à une pCourbe de l'espace définie par M points dont la valeur est donnée par :

$$M = \left( \sum m_i - d \right) * (N-1) + 1$$

Cette formule s'applique également aux pSurfaces immergées dans un pVolume (et de façon générale aux pFormes immergées dans des pFormes); il suffit de raisonner pour chaque dimension.

Voici un tableau récapitulatif, dans lequel on peut lire par exemple qu'une ipL3 dans une pS33 est une pL9 : (cf figure 8)

	pS22	pS32	pS33	pS43	pS44	pV222
ipL2	pL3	pL4	pL5	pL6	pL7	pL4
ipL3	pL5	pL7	pL9	pL11	pL13	pL7
ipL4	pL7	pL10	pL13	pL16	pL19	pL10
ipS22	pS33	pS44	pS55	pS66	pS77	pS44
ipV222	/	/	/	/	/	pV444

Le résultat fondamental est qu'une ipForme immergée dans une pForme est équivalente à une pForme de l'espace de degré plus élevé; c'est ce qui fait l'intérêt du concept de forme immergée, et l'on conviendra de parler dans tous les cas de pFormes.

Remarque 1 : il est intéressant de savoir qu'une pL19 de l'espace peut être ramenée à une ipL4 immergée dans une pS44. Sachant que la pL4 est souvent employée en infographie comme approximation de l'arc de cercle sur 90° (cf §41), on dispose d'une représentation approchée du cercle sur une pS44. De plus, sachant qu'une pS44 est souvent employée en infographie comme approximation d'une portion (1/8) de sphère, on dispose d'une représentation approchée simple d'un cercle sur une sphère. Ces constructions peuvent également être utiles dans le cas où l'on veut appliquer des anamorphoses à des figures du plan par exemple. Une déformation appliquée à un repère cartésien lié à une «résille pS44» transformera un segment en une pL4 et un arc de cercle en une pL19.

Remarque 2 : une pL19 de l'espace peut être ramenée à une ipL4 immergée dans une pS44 dont les iSegments sont des pL7. La connaissance de l'expression du point milieu d'une pL7 (cf § 23) rend évidente la construction généralisée de la cubique immergée dans la surface. Et une simple corde suffit.

Remarque 3 : une cubique (pL4) peut être vue comme issue de la double diagonalisation d'un cube gauche (pV222):  $pL4 = \text{DIAG}(\text{DIAG}(pV222))$ . De façon générale toute pForme peut être vue comme issue d'une suite de diagonalisations appliquées à une des premières pFormes obtenues par application composée des opérateurs primitifs MI() et MIR() sur deux points. Les pFormes sont en fait des formes multilinéaires récursives dégénérées: une cubique est un essentiellement un sous-ensemble de cube gauche.

Toutes ces pFormes relèvent de l'utilisation de trois opérateurs  $MI()$ ,  $MIR()$ ,  $DIAG()$  appliqués au départ sur un ensemble quelconque de points de l'espace, puis sur les formes générées, puis sur des formes appartenant à ces formes, etc.... Toutes ces pFormes sont basées sur des combinaisons linéaires à coefficients de Pascal. Nous étudierons maintenant de nouvelles combinaisons de ces pFormes afin d'étendre leur champ d'application à des cas plus complexes.

#### 4. Opérations sur les pFormes

Les pFormes sont des formes de Bézier généralisées et héritent de toutes leurs propriétés; notamment dans le cas des pCourbes:

- convexité: la pCourbe est contenue dans son polygone de contrôle;
- invariance affine: la transformée d'une pCourbe est la pCourbe construite sur les transformés des points de contrôle;
- dérivation: la «dérivée» (on devrait dire hodographe) d'une pCourbe ( $pL_n$ ) est une pCourbe ( $pL_{n-1}$ ) définie sur les différences des points de contrôle initiaux (le nombre de points est donc décrémenté de 1); les points de contrôle aux extrémités donnent immédiatement les repères tangents à une pCourbe (trièdre de Serret-Frenet  $TNB$ );
- insertion de points ou élévation de degré: on peut augmenter le nombre de points de contrôle sans modifier la forme d'une pCourbe, ce qui autorise l'application des opérateurs  $MI()$  et  $MIR()$  sur des pCourbes contrôlées par un nombre de points différents;
- découpe du polygone de contrôle en deux concaténés: permettant de tracer effectivement la pCourbe par approche récursive, application immédiate de l'algorithme de de Casteljau, y compris dans sa généralisation aux pCourbes immergées;

Pour plus d'informations, on pourra se rapporter à la bibliographie proposée en annexe et notamment aux ouvrages [5], [6] et [7].

Dans ce qui suit, nous n'évoquerons que les opérations de **projection** conique appliquée à une pForme pour produire des NURBS (et notamment des coniques), de **concaténation** de pFormes simples pour produire des pFormes plus complexes demeurant facilement manipulables, et de **composition linéaire** de pFormes produisant des carreaux de Coons, des surfaces tubées, des surfaces développables.

##### 4.1 Projection conique

La famille de formes pascaliennes à laquelle conduisent les constructions précédentes ne couvre pas, loin s'en faut, toutes les formes imaginables, même s'il est théoriquement

possible de définir un ensemble de points de contrôle permettant de s'approcher autant qu'on le veut d'une forme donnée.

Le cas de l'arc de cercle est un exemple de construction approchée par une pL4 (cubique) dont les quatre points de contrôle sont:

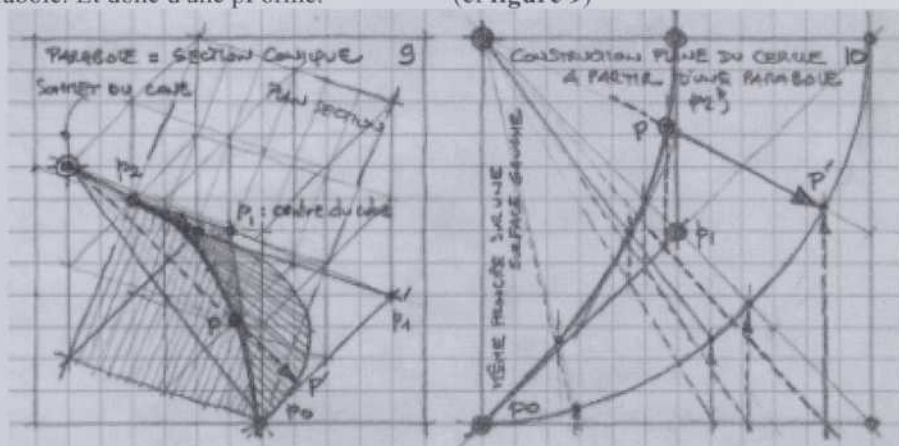
$$p_0 = [1,0], p_1 = [1,k], p_2 = [k,1], p_3 = [0,1],$$

avec  $k=4/3(\sqrt{2}-1)$ ,

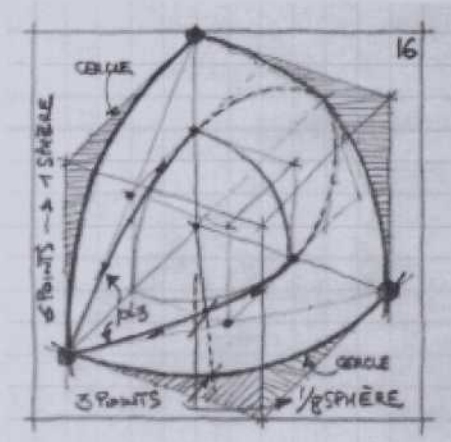
et la combinaison de tels arcs peut conduire à de bonnes approximations de cylindres, sphères et au delà de surfaces quelconques de révolution; noter que l'on génère ces surfaces sans faire l'usage de fonctions trigonométriques, ce qui présente l'avantage de calculs plus simples et ouvre ces formes à la flexibilité apportée par le contrôle par points. Cette approximation est utilisée dans un grand nombre d'outils infographiques.

Mais il ne s'agit là que d'approximations, et il faut chercher au delà une solution exacte au problème de la représentation de telles surfaces par une forme pascalienne. Aucune pCourbe ne peut être un arc de cercle, une approche algébrique en fournit facilement la preuve (l'expression paramétrique d'un arc de cercle contient des quotients de polynômes). La question se pose de savoir s'il existe un couple formé par une pForme et une transformation pouvant produire un cercle, et la réponse vient d'une propriété projective des coniques: «l'intersection entre un cône à base circulaire et un plan est un cercle, une ellipse, une parabole ou une hyperbole, suivant l'inclinaison du plan par rapport à l'axe du cône.» Vues depuis le sommet du cône, toutes ces courbes sont identiques: un arc de cercle peut toujours être obtenu par projection conique d'un arc de parabole. Et donc d'une pForme.

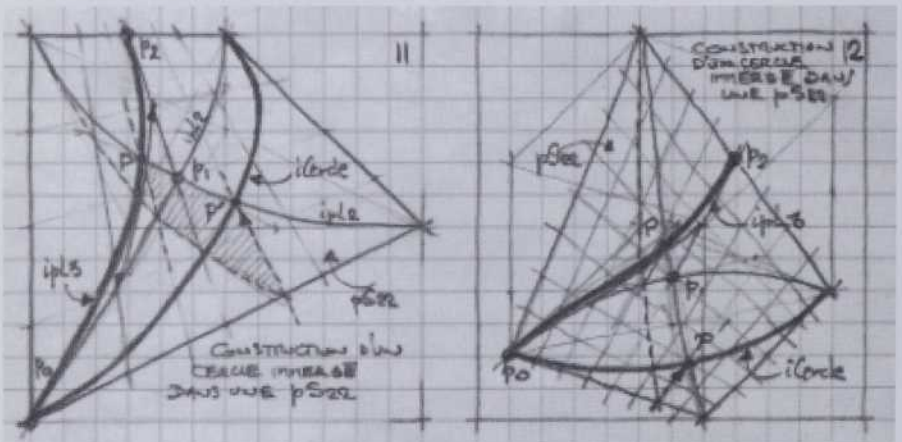
(cf figure 9)



Il est utile d'établir une construction plane équivalente à la projection conique d'une pL3 (arc de parabole) produisant un arc de cercle: (cf **figure 10**). Cette construction permet d'envisager la construction d'une sphère sur la base de 6 points (cf **figure 16**).



De plus, la parabole étant donnée, cette construction ne fait intervenir que des tracés de segments et des intersections et rien n'empêche de la généraliser au cas de pSurfaces quelconques, en utilisant des iSegments, et de construire un iCercle parfait sur une pSurface, (cf **figures 11, 12**).



On dispose ainsi d'une technique générale pour créer un arc de cercle et les formes de révolution, toutes les coniques et au delà un ensemble de formes dites «rationnelles»: il suffit soit de créer et de composer les pFormes dans un hyper\_espace  $R_{n+1}$  et de les replonger dans l'espace  $R_n$  pour obtenir le résultat recherché; soit d'utiliser des constructions planes analogues à celle du cercle (cf **figure 10**) dans la simple application du principe de base de la géométrie descriptive défini par Monge, son créateur: «*art de traiter des formes de l'espace sans jamais les représenter* (autrement que par leurs projections planes)».

#### 4.2 Concaténation

Lorsque l'on est conduit à utiliser plus de trois ou quatre pFormes génératrices les constructions peuvent devenir problématiques. En considérant le cas le plus simple, celui des pCourbes, un premier inconvénient est le fait que la courbe engendrée ne passe que par les points de contrôle aux limites; un deuxième inconvénient est que les enchaînements récursifs deviennent prohibitifs avec le nombre grandissant de points; un troisième inconvénient est le caractère global du comportement de la courbe: le déplacement d'un seul point modifie la totalité de la courbe.

On imagine alors de concaténer plusieurs pCourbes contrôlées par un même nombre de points en définissant des règles de raccordement assurant la continuité des tangentes, de la courbure et de la torsion. Plusieurs approches sont possibles.

L'approche la plus simple est la suivante:  $N$  points  $Q_i$  étant donnés, on construit les points milieux:

$$p_i = MI(Q_i, Q_{i+1}) \quad \text{avec } i=[0, N-1]$$

et les  $pL3 = MIR(p_i, p_{i+1}, p_{i+2})$

constituant ainsi une concaténation de paraboles dont les tangentes aux points de contact sont colinéaires et de même norme. Le problème vient du fait que chaque arc de parabole est plan et que la continuité de la torsion n'est pas assurée dans le cas général tridimensionnel. On peut aussi travailler avec des pL4 (cubiques) mais le nombre de points de contrôle doit être pair, et le positionnement des points n'est pas libre si l'on veut assurer la continuité de la torsion aux points de contact. Ces deux approches rendent malgré tout bien des services notamment en dessin 2D.

L'approche la plus connue est l'approche «B\_spline» que nous allons brièvement exposer ci-dessous: sur N points  $Q_i$  on fait glisser une «fenêtre» de largeur 2, 3 ou 4 points (ou plus), le glissement se faisant par incrément d'un point dans chaque cas:

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} >| < \\ Q_0 Q_1 \\ Q_1 Q_2 \end{array} &
 \begin{array}{c} >| < \\ Q_0 Q_1 Q_2 \\ Q_1 Q_2 Q_3 \\ Q_2 Q_3 Q_4 \end{array} &
 \begin{array}{c} >| < \\ Q_0 Q_1 Q_2 Q_3 \\ Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 \\ Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 \\ Q_3 Q_4 Q_5 Q_6 \end{array}
 \end{array}$$

1) Avec une fenêtre de 2 points ( $Q_i, Q_{i+1}$ ) on définit deux points comme suit:

$$\begin{aligned}
 p_0 &= Q_i \\
 p_1 &= Q_{i+1}
 \end{aligned}$$

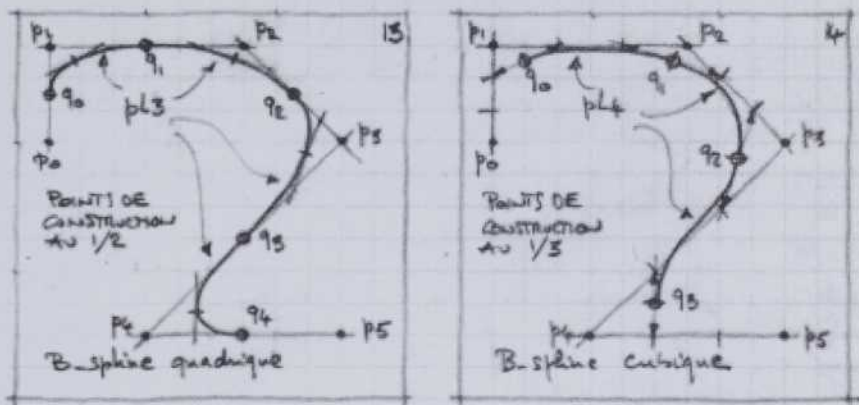
utilisés comme points de contrôle d'une pL2 (segment) par fenêtre, et l'on obtient simplement la suite des segments formant le polygone de base, une B-spline de degré 1.

2) Avec une fenêtre de 3 points ( $Q_i, Q_{i+1}, Q_{i+2}$ ) on définit trois points comme suit: (cf figure 13)

$$\begin{aligned}
 p_0 &= 1/2( Q_i + Q_{i+1} ) \\
 p_1 &= 1/2( 2.Q_{i+1} ) \\
 p_2 &= 1/2( Q_{i+1} + Q_{i+2} )
 \end{aligned}$$

utilisés comme points de contrôle d'une pL3 (parabole) par fenêtre. Par construction, les courbes successives se raccordent, possèdent des tangentes colinéaires et de même module, mais des plans osculateurs en général distincts (discontinuité de la torsion). Le point milieu de la composante  $i$  de la B\_spline de degré 2 s'écrit:

$$\begin{aligned}
 M &= 1/4( p_0 + 2.p_1 + p_2 ) \\
 &= 1/8( Q_i + 6.Q_{i+1} + Q_{i+2} )
 \end{aligned}$$



3) Avec une fenêtre de 4 points ( $Q_i, Q_{i+1}, Q_{i+2}, Q_{i+3}$ ) on définit quatre points comme suit: (cf figure 14)

$$p_0 = 1/6(Q_i + 4.Q_{i+1} + Q_{i+2} )$$

$$p_1 = 1/6( 4.Q_{i+1} + 2.Q_{i+2} )$$

$$p_2 = 1/6( 2.Q_{i+1} + 4.Q_{i+2} )$$

$$p_3 = 1/6( Q_{i+1} + 4.Q_{i+2} + Q_{i+3} )$$

utilisés comme points de contrôle d'une pL4 (cubique) par fenêtre. Par construction, les cubiques successives se raccordent, possèdent des tangentes colinéaires et de même module, et des plans osculateurs confondus (continuité de la torsion).

Le point milieu de la composante i d'une B\_spline de degré 3 s'écrit:

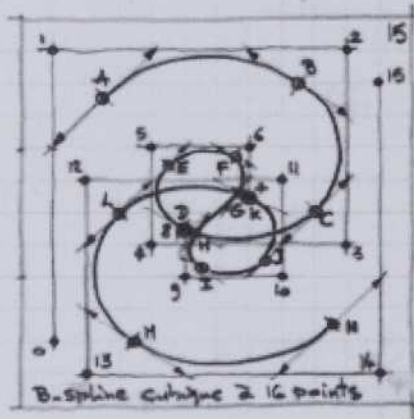
$$M = 1/8 ( p_0 + 3.p_1 + 3.p_2 + p_3 )$$

$$= 1/48 ( Q_i + 23.Q_{i+1} + 23.Q_{i+2} + Q_{i+3} )$$

On notera que les B\_splines ne passent par aucun point de contrôle. L'utilisation de «points fantômes» en début et en fin permet de contraindre la courbe à passer par les points extrêmes; en début on ajoute le point symétrique du second point par rapport au premier ce qui amène la courbe sur le premier point, et enfin on «cache» ce point. Une autre méthode est de confondre deux ou trois points successifs ce qui amène la courbe à passer par le point «multiple». Une troisième méthode simule une interpolation: on cache les points de contrôle initiaux, on n'affiche que les points de contrôle des pCourbes (par

exemple des pL4), marquant p0 et p3 comme noeuds de jonction de deux courbes successives et les points p1 et p2 comme extrémités des tangentes aux noeuds.

En conclusion on retiendra que les B\_splines sont fondamentalement des concaténations de pCourbes dont les points de contrôle sont obtenus à partir des points de base par de simples transformations linéaires «glissantes», (cf fig 15). Ces propriétés s'étendent aux pSurfaces, aux pVolumes et au delà à toutes les formes pascaliennes. On peut enfin dire que les NURBS (non uniform rational B-splines) sont des projections coniques de concaténations B-spline de formes pascaliennes.



### 4.3 Compositions linéaires de pFormes

Nous avons vu que toute combinaison linéaire de points dont la somme des coefficients est égale à 1 produit un point «valable» (invariant dans un changement de repère). Il en est de même des pFormes, issues en dernière analyse de combinaisons valables de points:

$$pF = \sum k_i \cdot pFi, \quad \text{avec } \sum k_i = 1.$$

On connaît déjà la forme milieu de deux formes ou de n formes, et les formes produites à l'aide de l'opérateur MIR(). La combinaison suivante de surfaces:

$$S = S0 + S1 - S2 \quad (1+1-1 = 1)$$

est utilisée dans la définition des carreaux de Coons; on démontre que la surface résultante S interpole les 4 courbes initiales.

Soient 4 pCourbes  $pLn1\_1$ ,  $pLn2\_2$ ,  $pLn3\_3$ ,  $pLn4\_4$ , concourantes deux à deux aux points P00, P01, P10, P11. Egalisant par insertion le nombre de points de contrôle des 4 pCourbes à la valeur commune  $n$  ( $n1 = n2 = n3 = n4 = n$ ; on peut réécrire la combinaison sous la forme:

$$\begin{aligned}
 S = & \text{MIR}( pLn\_1, pLn\_3 ) & + & & // S0 \\
 & \text{MIR}( pLn\_2, pLn\_4 ) & - & & // S1 \\
 & \text{MIR}( P00, P01, P10, P11 ) & & & // S2
 \end{aligned}$$

Mais on peut également appliquer cette combinaison aux points de contrôle (en nombre identique) de S0, S1 et S2, construire le milieu:

$$\begin{aligned}
 P_m = & \text{MI}( pLn\_1, pLn\_3 ) + \\
 & \text{MI}( pLn\_2, pLn\_4 ) - \\
 & \text{MI}( P00, P01, P10, P11 )
 \end{aligned}$$

et lancer une récursion pour obtenir une pSurface. Le résultat est qu'une surface de Coons construite sur des pCourbes est une pSurface.

Remarque: cela devrait être aussi le cas des surfaces de Gordon.

#### 4.4 Tubages de pFormes

On exprime les surfaces tubées de la façon suivante:

$$S = pLn\_c + [A] * pLn\_s, \quad (\text{cf figure 18})$$

où  $pLn\_c$  est une pCourbe «chemin»,  $pLn\_s$  une pCourbe section, et  $[A]$  une matrice  $3 \times 3$ , construite en général sur le trièdre de Serret-Frenet [TNB] associé à la pCourbe  $pLn\_c$ . L'expression est valable dans la mesure où le deuxième terme n'est pas un point mais un vecteur (la somme d'un point et d'un vecteur produit un point translaté).

Exemples de tubages: un chemin rectiligne crée un prisme qui est une pSurface, un chemin circulaire crée une surface de révolution (cas particuliers le tore et la sphère) qui est la projection conique d'une pSurface.

Remarque: la question reste de savoir si dans le cas général un tubage sur deux pCourbes est une pSurface associée ou non à une transformation particulière.

#### 4.5 Développée de pCourbes

On démontre que l'extrémité du vecteur tangent en un point parcourant une pLn, se déplace sur une pLn; la surface engendrée par ce vecteur tangent est une pS2n, une surface réglée qui est de plus développable, c'est à dire qui peut être déroulée sur un plan sans pli ou déchirement ( une cône est une surface développable, une sphère non).

Remarque: la surface engendrée par la normale (ou la binormale) est-elle une pSurface?

#### 4.6 Interpolation

L'interpolation a été abordée brièvement au §42 à l'occasion de l'étude de la concaténation B-spline. Nous précisons maintenant le problème au travers de quelques cas particuliers, en cherchant à chaque fois une pLN interpolante.

##### 4.6.1 pL3 interpolant trois points

Le point milieu d'une pL3 s'écrit:

$$B1 = (P0 + 2.P1 + P2)/4$$

et inversement, on peut exprimer P1 sous la forme:

$$P1 = 2.B1 - (P0+P1)/2$$

ce qui nous permet d'écrire la pL3 interpolant trois points B0, B1, B2 sous la forme:

$$pL3 = \text{MIR}( B0, 2.B1 - (B0+B1)/2, B2 )$$

##### 4.6.2 pL4 interpolant quatre points

Les points au 1/3 et au 2/3 d'une pL4 s'écrivent:

$$B1 = (8.P0 + 12.P1 + 6.P2 + P3)/27$$

$$B2 = (P0 + 6.P1 + 12.P2 + 8.P3)/27$$

expressions que l'on peut inverser ainsi:

$$P1 = (-5.P0 + 18.B1 - 9.B2 + 2.P3)/6$$

$$P2 = (2.P0 - 9.B1 + 18.B2 - 5.P3)/6$$

ce qui nous permet d'écrire la pL4 interpolant quatre points B0, B1, B2, B3 sous la forme:

$$pL4 = \text{MIR}( B0, (-5.B0 + 18.B1 - 9.B2 + 2.B3)/6, \\ (2.B0 - 9.B1 + 18.B2 - 5.B3)/6, B2 )$$

Le point milieu de la pL4 peut s'écrire en fonction des points interpolés:

$$pM = (-B0 + 9.B1 + 9.B2 - B3)/16$$

résultat que l'on peut retrouver en appliquant l'algorithme d'AITKEN (cf ref [5] ) au cas de 4 points interpolés par une cubique, les points étant affectés des valeurs nodales [0, 1/3, 2/3, 1].

#### 4.6.3 Courbe interpolant N points

3 points affectés de valeurs nodales réparties uniformément

[0, 1/2, 1] peuvent être interpolés par une pL3, 4 points affectés de valeurs nodales réparties uniformément [0, 1/3, 2/3, 1] peuvent être interpolés par une pL4 et la généralisation à un nombre supérieur de points se conçoit sans peine.

Mais au delà de quatre points, il est préférable de rechercher une concaténation de pL3 ou de pL4; nous nous bornerons à étudier l'interpolation cubique d'un nombre quelconque de points en considérant avec Catmull-Rom et Overhauser que la tangente en un point  $B_i$  est parallèle à la corde  $B_{i-1}B_{i+1}$ . En plus de cette hypothèse, nous considérerons que les deux tangentes opposées en  $B_i$  sont égales et de norme égale au 1/4 de la corde  $B_{i-1}B_{i+1}$ . Avec ces hypothèses, les extrémité des tangentes à gauche et à droite s'écrivent:

$$T_g = (-B_{i-1} + 4.B_i + B_{i+1})/4$$

$$T_d = (B_i + 4.B_{i+1} + B_{i+2})/4$$

et la pL4 interpolant les points  $B_i$  et  $B_{i+1}$  peut s'écrire:

$$pL4 = \text{MIR}( B_i, (-B_{i-1} + 4.B_i + B_{i+1})/4, \\ (B_i + 4.B_{i+1} + B_{i+2})/4, B_{i+1} )$$

Noter que cette expression fait intervenir un point avant et un point après les deux points interpolés, ce qui impose deux points fantômes aux extrémités,  $B_{-1}$  et  $B_{N+1}$ .

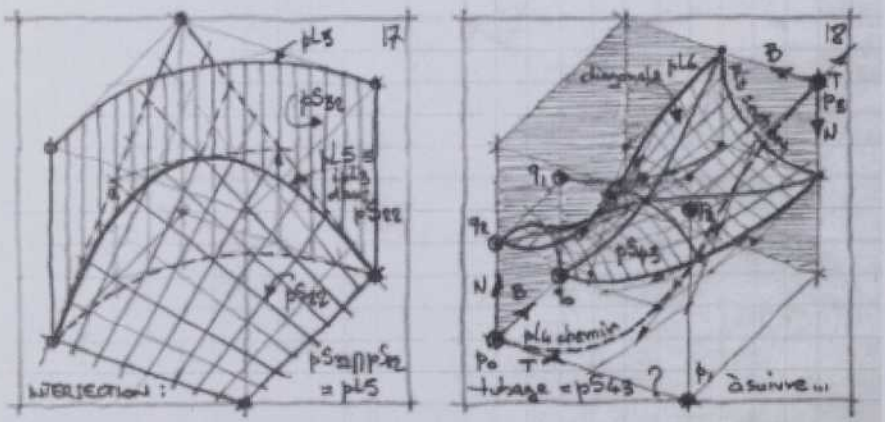
Le problème de l'interpolation est vaste et de nombreux travaux lui ont été consacrés. Les indications précédentes ont pour seul objectif de montrer qu'on peut le ramener dans certains cas à une composition de pCourbes. Et peut-être dans tous les cas, séries nodales non-uniformes par exemple, comportement dissymétrique aux noeuds (béta-splines), etc..., mais ceci reste à démontrer.

#### 4.7 Conclusion sur les opérations sur les pFormes

D'autres formes seraient à étudier comme produits d'opérateurs sur les pFormes, les intersections de pFormes (cf **figure 17**), et pourquoi pas, les surfaces quasi-minimales satisfaisant à l'équation de Laplace, dont l'expression aux différences finies du point courant:

$$P_{i,j} = (P_{i-1,j} + P_{i+1,j} + P_{i,j-1} + P_{i,j+1}) / 4$$

rappelle la définition du point milieu d'une facette gauche; une pSurface judicieusement choisie pourrait peut-être, avec ses iSegments et autres iCourbes, être un bon guide pour l'étude des surfaces quasi-minimales.



Remarque: l'opérateur MI() est central dans la génération des formes pascaliennes, mais on pourrait en imaginer des variantes fructueuses. L'ensemble de Cantor (1883) est un semis fractal de points défini comme l'attracteur de la famille de deux homothéties de rapport 1/3 et de centres 0 et 1. Le rapport 1/3 n'est pas choisi au hasard: si l'on prenait 1/2 on obtiendrait une bonne pCourbe (pL2) qui n'est pas du tout fractale... On peut penser qu'un opérateur TIERS() retournant deux points au 1/3 et au 2/3 et l'opérateur TIERSR() associé pourraient engendrer des pFormes fractales bien intéressantes. On peut également penser à une définition engendrant des pFormes de Peano généralisées, par exemple des pFormes de dimension topologique 1 et de dimension fractale 2, diagonales d'on ne sait quel pMonstre. Et pourquoi pas un opérateur ALEA() retournant un point aléatoire entre deux points ( bien utile à vrai dire pour engendrer une distribution équilibrée (gaussienne) sur toute la forme) ?

Tout ces chemins ont été explorés bien avant par des générations de mathématiciens talentueux qui les ont balisés dans de puissantes théories, et s'il n'y a donc rien de bien nouveau ici, nous espérons simplement qu'une relecture différente basée sur des gestes plus élémentaires permettra au non mathématicien d'y voir plus clair et d'acquérir une bonne maîtrise sur les formes gauches.

## 5. Implémentation en JAVA

Il se trouve que l'approche «gestuelle» développée jusqu'ici peut facilement être traduite en termes immédiatement compréhensibles par l'ordinateur: l'ordinateur sait en effet très bien appliquer récursivement des divisions par deux et c'est tout ce qui lui est demandé dans cette approche.

Sont brièvement présentées ci-dessous la classe fondamentale implémentant en Java les opérateurs de base et quelques manipulations ayant permis de les tester. Les commentaires (//) montrent le caractère élémentaire et non analytique des opérations effectuées, et notamment le fait qu'il n'y a aucune gestion de tableau, pas de référence à une quelconque dimension; noter que quatre fonctions (go\_DOWN, go\_UP, go\_RIGHT, go\_LEFT) suffisent pour naviguer dans les hiérarchies de formes de contrôle, quelle que soit la dimension de la forme: on peut sélectionner un point (pour le déplacer), mais aussi une courbe entière, ou une surface, etc...

L'écriture d'un programme complet reste à faire; les sorties infographiques présentées en annexe sont issues de programmes basés sur des classes spécifiques à chaque forme (classe BEZIER, SPLINE, COONS, TUBAGE, MINIMALE, etc...); la nécessité d'une redéfinition plus unitaire sur la base d'une seule classe génératrice s'est faite sentir rapidement et a été à l'origine de la présente étude.

```

class FORM
{
// ..... ATTRIBUTS:
    FORMleft = null, // soeur cadette
        right = null, // soeur aînée
        up = null, // forme mère
        down = null; // première fille
    POINTp = null; // point
    boolean diag = false; // point diagonal

// ..... CONSTRUCTEURS:
    public FORM( double x, double y, double z ) // un point x,y,z
    public FORM( POINT p ) // un point p
    public void add( FORM f ) // addition d'une forme fille

// ..... AFFICHAGE dessine dans la fenêtre
    public final void draw( Graphics g, REP rep )

// ..... OPERATEURS
    private final FORM MI( FORM fa, FORM fb ) // milieu de deux formes
    private final void MIR( int n, up_down ) // récursion ++ ou --
    private final void DIAG( ) // les points diagonaux
    public final boolean keyDown( Event e, int key ) // interf clavier
    private final void go_DOWN( ) // déplacement dans les
    private final void go_UP( ) // quatre directions pour
    private final void go_LEFT( ) // sélectionner les points
    private final void go_RIGHT( ) // de contrôle.
    ...
}

```

```
// détail de l'opérateur fondamental MI() :
private final FORM MI( FORM fa, FORM fb )
{
    FORM fm = null;
    if ( fa.p != null && fb.p != null )           // formes finales
        fm = new FORM( POINT.milieu( fa.p, fb.p ) );
    else                                           // formes branche
    {
        FORM f0 = fa.down;                       // 1ère fille de fa
        FORM f1 = fb.down;                       // 1ère fille de fb
        FORM m = MI( f0, f1 );                   // forme milieu
        fm = new FORM( m );                      // m fille de fm
        while ( f0.right != null && f1.right != null )
        {
            f0 = f0.right;                       // la suivante
            f1 = f1.right;                       // idem
            FORM mm = m;                         // memorise m
            m = MI( f0, f1 );                    // le nouveau milieu
            mm.right = m;                        // mm ---> m
            m.left = mm;                        // mm <--- m
        }
    }
    return fm;
}
}
```

```
// détail de l'opérateur DIAG() :
private final void DIAG()
{
    this.set_diag( false );
    int i = 0;
    for ( FORM f = this.down; f != null; f = f.right )
    {
        int j = 0;
        for ( FORM ff = f.down; ff != null; ff = ff.right )
        {
            if ( i == j )    ff.set_diag( true );
            j++;
        }
        i++;
    }
}
}
```

**Exemple: création d'un cube gauche et manipulations diverses**

```

POINT p000 = new POINT( -0.5,-0.5,-0.5 ); // les 8 points...
POINT p010 = new POINT( 0.5,-0.5,-0.5 ); // ...
POINT p100 = new POINT( -0.5, 0.5,-0.5 );
POINT p110 = new POINT( 0.5, 0.5,-0.5 );
POINT p001 = new POINT( -0.5,-0.5, 0.5 );
POINT p011 = new POINT( 0.5,-0.5, 0.5 );
POINT p101 = new POINT( -0.5, 0.5, 0.5 ); // ...
POINT p111 = new POINT( 0.5, 0.5, 0.5 ); // ... du cube.

FORM pV222, pS22, pL2; // trois formes
  pV222 = new FORM( ); // créer le cube
    pS22 = new FORM( ); // créer une facette
      pL2 = new FORM( ); // créer un segment
        pL2.add( p000 ); // ajouter un point au segment
        pL2.add( p010 ); // un second
      pS22.add( pL2 ); // ajouter le segment à la facette
        pL2 = new FORM( ); // créer un autre segment
        pL2.add( p100 ); // ajouter un point au segment
        pL2.add( p110 ); // un second
      pS22.add( pL2 ); // ajouter le segment à la facette
    pV222.add( pS22 ); // ajouter la facette au cube
      pS22 = new FORM( ); // et recommencer avec la seconde
        pL2 = new FORM( );
        pL2.add( p001 );
        pL2.add( p011 );
      pS22.add( pL2 );
        pL2 = new FORM( );
        pL2.add( p101 );
        pL2.add( p111 );
      pS22.add( pL2 );
    pV222.add( pS22 ); // le cube gauche est défini.

FORM pS32 = pV222.diagonale(); // parabolöide réglé

FORM pL4 = pS32.diagonale(); // cubique

```

cubique qui pourrait être définie directement à partir de quatre points [p0, p1, p2, p3] par les instructions suivantes:

```
FORM      pL4 = new FORM(); // une forme
pL4.add( p0 );           // au départ un point
pL4.add( p1 );           // c'est un segment
pL4.add( p2 );           // puis une parabole
pL4.add( p3 );           // enfin une cubique
```

Enfin, une bicubique peut être définie à partir de quatre cubiques [pL4\_0, pL4\_1, pL4\_2, pL4\_3]:

```
FORM pS44 = new FORM( ); // une forme
pS44.add( pL4_0 );       // au départ une cubique
pS44.add( pL4_1 );       // une cubique réglée
pS44.add( pL4_2 );       // une cubique «parabolée» :)
pS44.add( pL4_3 );       // une bicubique
```

et sa diagonale:

```
FORM pL7 = pS44.diagonale( );
```

est une pCourbe définie par 7 points

## Conclusion

Il faut se souvenir qu'aucun autre outil qu'une **simple corde** n'a été requis pour construire ces formes, ni le besoin de recourir à la moindre formulation analytique. L'application de trois opérateurs fondamentaux MI(), MIR(), DIAG() à un ensemble initial de points de l'espace, nous a permis d'engendrer une famille de formes, les pFormes; nous avons étudié les relations entre les pFormes immergées dans d'autres pFormes (les ipFormes) et les pFormes de l'espace, nous les avons concaténées pour produire des B-splines, projetées coniquement pour produire des formes rationnelles (NURBS), combinées linéairement pour produire des formes plus complexes (Coons). Les formes pascaliennes et les opérateurs associés constituent ainsi un outil de conception, de représentation et de manipulation d'une famille importante de formes géométriques.

On peut imaginer quelques utilisations de cette approche des formes:

- en informatique, pour concevoir un modeleur 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. L'implémentation actuelle, qui n'en est qu'à ses débuts, est basée sur une classe FORM (en JAVA) munie des méthodes MI( ), MIR( ) et DIAG( ).

- en géométrie, pour proposer au réfractaire total à l'algèbre et à la géométrie analytique 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, l'attention étant reportée sur le positionnement harmonieux des points et lignes de contrôle, formant des résilles virtuelles assemblées en cubes, cylindres, sphères et polyèdres divers suivant les règles immémoriales de la composition léguées par les grands ancêtres.

La présente étude n'en constitue qu'une première ébauche...

### Bibliographie sommaire

- |     |   |                        |        |
|-----|---|------------------------|--------|
| [1] | GAMOV G (1946)                                  | édition Dunod          | (1965) |
|     | Monsieur Tompkins au pays des Merveilles        |                        |        |
| [2] | ROGERS DF ADAMS JA                              | édition Mc Graw Hill   | (1990) |
|     | Mathematical Elements for Computer Graphics     |                        |        |
| [3] | UPSTILL S                                       | édition Addison-Wesley | (1990) |
|     | The Renderman Companion                         |                        |        |
| [4] | SNYDER JM                                       | édition Academic Press | (1992) |
|     | Generative Modeling for Computer Graphics & CAD |                        |        |
| [5] | FARIN G   | édition Masson         | (1992) |
|     | Courbes et surfaces pour la CGAO,               |                        |        |
| [6] | LES PIEGL WAYNE TILLER                          | édition Springer       | (1996) |
|     | The NURBS Book                                  |                        |        |
| [7] | DEMENGEL G. POUGET JP                           | édition Ellipses       | (1998) |
|     | Modèles de Bézier, des B-Splines et des Nurbs   |                        |        |

## Vers une modélisation spatiale hybride en conception déclarative des scènes 3D

**Lozka Popova**

*Professeur au Département d'informatique, Université de Poitiers, France*

*E-mail : popova@sic.univ-poitiers.fr*

**Résumé.** *Les aspects spatiaux sont présents dans de nombreux domaines de recherche, que ce soit en modélisation géométrique, CAO, contrôle industriel, transport, ingénierie de l'environnement, bases de données géographiques, etc. 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 ». Ces informations spatiales, de type non numérique, sont très souvent décrites en termes de relations entre objets. Une approche de type algèbre formelle est donc naturelle par laquelle on détermine des types d'objets que l'on dira spatiaux pour représenter ces données et des relations pour représenter les informations les concernant. Afin de raisonner sur ces informations, des systèmes de règles sont établis qui permettent de faire des déductions. Restreintes à une dimension, les informations spatiales sont similaires aux informations temporelles. Les modèles cognitifs propres au raisonnement spatial qualitatif sont plus récents.*

*Une configuration spatiale peut s'obtenir par des actions de positionnement et d'orientation en termes de coordonnées 3D. Le principe de base consiste à résoudre les contraintes de la configuration par composition de relations spatiales binaires. Ce mécanisme permet de déduire des informations topologiques à partir de données initiales pouvant être incomplètes. Outre une expertise de la scène, un formalisme spatial de représentation formelle et de raisonnement est nécessaire à ce genre de problème.*

*Nous proposons un modèle hybride de résolution de configurations spatiales en conception déclarative de scènes 3D. L'objectif de ce modèle est la représentation des informations spatiales connues d'une configuration d'objets 3D et la déduction des informations non explicites sur leur localisation. En tenant compte des paramètres*

*spatiaux sur la localisation, l'orientation, la taille, les relations et la distance entre les objets composants «cibles» et de «référence» on cherche à classifier les composants d'une scène complexe 3D par rapport aux caractéristiques de sa boîte englobante et le volume qu'elle peut occuper. Ce volume joue le rôle de «cadre de référence 3D» et peut être identifié par le découpe récursif de l'espace de la scène en octants, jusqu'au niveau de granularité nécessaire pour englober la boîte de la «cible». Les feuilles de l'arbre de découpe associé, communément appelé «octree», subdivisent l'espace de manière discrète. Cela permet d'avoir un nombre fini d'objets à considérer dans la configuration. Sur chacune des coordonnées de l'espace à trois dimensions (largeur, hauteur, profondeur), les octants «cadres» se réduisent à des intervalles. La position relative de deux octants et des boîtes qu'ils contiennent peut alors se décrire en termes des 13 relations d'Allen. Connaissant la position d'un objet A par rapport à son cadre de référence CRéf, il est possible d'inférer la position de tout objet B par rapport à CRéf, connaissant sa position par rapport à A.*

*Les avantages de modélisation spatiale hybride sont : 1) Description qualitative de la configuration spatiale et spécifications quantitatives des contraintes géométriques; 2) Conception à base de connaissances - contraintes qualitatives et numériques de positionnement, octants et objets de référence; 3) utilisation de la richesse du langage naturel pour le raisonnement spatial par un locuteur ; 4) traitement de l'information locale et 5) vérification de la cohérence de la description.*

*Les limites de l'approche proviennent essentiellement du fait des approximations inhérentes aux techniques de discrétisation de l'espace 3D.*

**Mots clés :** CAO, modélisation spatiale, raisonnement spatio-temporel, CSP, scènes synthétiques

## 1. Introduction

Les projets sur la conception des objets spatiaux 3D utilisent en général deux grandes approches de formalisation: approches *quantitatives* et approches *qualitatives*. Le premier groupe contient des méthodes algorithmiques numériques sur la représentation et la résolution de contraintes spatiales. Les approches quantitatives sont fondées historiquement sur l'utilisation de méthodes impératives ascendantes et présentent certaines difficultés dans la gestion des variantes de solutions et leur consistance. Les méthodes qualitatives, comme on le verra plus loin, sont le résultats des recherches menées en IA (*Intelligence artificielle*) durant cette dernière dizaine d'années et sont

étroitement liées avec les approches de modélisation géométrique déclarative, de représentation et résolution des problèmes à base de connaissances.

La méthodologie récente de modélisation géométrique déclarative (Lucas, 90, Plemenos, 91) sert à palier les problèmes des approches traditionnelles. Elle permet d'obtenir plusieurs variantes de solutions à partir d'une description des concepts et des propriétés de haut niveau d'abstraction. Les contraintes permettent la génération de solutions individuelles, instances explicites des modèles géométriques. C'est une méthodologie descendante, qui laisse des marges de liberté du choix pour les méthodes de création et de validation des modèles géométriques.

Parmi les désavantages présents dans l'approche géométrique déclarative, on constate certaines limites dues à la difficulté de trouver un vocabulaire représentatif de la description sémantique, fondé sur des schèmes linguistiques non ambiguës, possédant une structure qui facilite la description de la scène, la gestion optimale des solutions générées et le temps de calcul.

Une première approche permettant de pallier à ces problèmes, consiste à trouver des techniques de guidage des scénarios de a) génération, b) positionnement et c) d'assemblage des composantes des scènes de manière optimale et plus naturelle. Elle doit permettre l'automatisation du calcul des paramètres des modèles et la déduction des informations manquantes dans la description initiale utilisée. Les méthodes de satisfaction de contraintes définies en IA comme CSP (*Contraintes satisfaction problem*) se prêtent à cette tâche.

Récemment a émergé un autre groupe d'approches qui abordent le problème avec des techniques du raisonnement spatial qualitatif. Les travaux menés dans le champ du raisonnement spatial qualitatif sont essentiellement confrontés à des problèmes de représentation (quelle est l'ontologie de l'espace, quelles en sont les entités de base et les notions primitives). Ce nouveau domaine attire l'intérêt des communautés scientifiques dans plusieurs domaines (Construction de cartes génomiques dans la biologie moléculaire (Schmeltzer,95), CAO architecturales (Donikian,92), (Goulette, 97). Traitement du langage naturel (Aurnague&al,96), Systèmes de planification dans la robotique (Mukerjee,90), Représentation des connaissances en IA (Hernandez, 94), Systèmes géographiques (Jeansoulin,97).

Les principes de la représentation de l'espace se basent sur les principes de la représentation du temps, en particulier d'après des articles d'Allen (Allen, 83) et de Freksa (Freksa, 92). Les différentes approches sont attachées à donner une ontologie de l'espace. Définir une ontologie revient à déterminer tous les concepts qui modélisent un domaine et les relations les liant. Nous nous consacrerons ici plus particulièrement aux relations liant des concepts spatiaux. Ces relations sont divisées en trois groupes : les relations topologiques, les relations de distance et les relations d'orientation. Les deux

dernières sont définies dans des cadres de référence. Ces trois relations permettent de donner une représentation hybride qualitative - quantitative.

Notre travail concerne l'étude du positionnement d'un ensemble d'objets afin de construire la configuration spatiale d'une scène 3D. La configuration est créée par la localisation d'objets, composantes statiques, représentées par des modèles de solides 3D, en satisfaisant les contraintes topologiques utilisées sur l'espace. On suppose qu'une scène est un espace 3D borné par des bords fixés, orientés parallèlement aux axes d'un repère cartésien. L'orientation des composantes de la scène peut être déduite à partir de son agencement. L'évolution d'un composant au sein d'un processus de conception, dépend non seulement de sa propre position, mais aussi de la position des autres composantes déjà en place, voire à placer.

L'article comporte quatre parties. Après cette introduction, nous présentons dans la seconde partie les concepts nécessaires à la formulation du supporte méthodologique au raisonnement spatial en conception déclarative de scènes. La troisième partie présente la structure du modèle hybride de la méthode de résolution de configurations spatiales que nous proposons. La dernière partie fournit un premier bilan et se termine avec quelques perspectives.

## 2. Représentation de l'espace

On distingue deux axes majeurs des formalismes de représentation des caractéristiques de l'espace (Mukerjee,96):

1.les méthodes précises, basées sur la spécification exacte des valeurs de ces caractéristiques (techniques quantitatives de positionnement dans l'espace  $n$ -dimensionnel des coordonnées)

2.les méthodes imprécises, basées sur le découpage de l'espace du domaine en régions, où le positionnement et le découpage lui-même se donnent dans un degré élevé d'ambiguïté par des techniques qualitatives.

Les deux paradigmes présentent des avantages et des inconvénients: les méthodes quantitatives permettent l'obtention d'une solution exacte avec un niveau de détail élevé, dans le cas de la présence d'informations complètes pour les paramètres du positionnement, à l'opposé les méthodes qualitatives permettent l'obtention des solutions expressives intermédiaires dans un cycle de conception. Comme inconvénients, on peut signaler le manque d'une échelle sur différentes propriétés dans le premier cas et du manque de mesures quantitatives des attributs de positionnement dans le deuxième cas. Les inconvénients mentionnés sont surmontés en utilisant des techniques hybrides afin de mesurer de manière qualitative des échelles et de manière quantitative les attributs qualitatifs.

D'après Hernandez, la plupart des approches de représentation de l'espace reposent sur les approches quantitatives dans lesquelles les données relatives à l'espace sont assimilées à des informations numériques précises et exactes. L'auteur remarque que les approches numériques ne s'adaptent généralement pas aux verbalisations usuelles des descriptions spatiales. Verbalisations qui utilisent une approche qualitative de l'espace. Selon lui la représentation d'une description qualitative dans une approche quantitative de l'espace se heurte à cinq types de problèmes (Hernandez, 95):

- La complexité : la quantité (le nombre) des valeurs que peuvent prendre les variables de description peut affecter indirectement la complexité des algorithmes qui les traitent;
- les effets falsifiants : les modèles numériques pourraient en réalité falsifier la représentation par des décisions discrètes prises;
- l'information partielle et incertaine: due à la nature des approches quantitatives si les valeurs des variables ne sont pas connues « exactement » (elles sont déterminées par une échelle fixée), elles peuvent être soit ignorées, soit interprétées en affectant l'intervalle des valeurs possibles;
- le manque de description adéquate : l'homme a du mal à déterminer exactement les longueurs, les volumes, etc., tandis qu'il peut effectuer facilement des comparaisons qui dépendent du contexte. Les approches numériques, cependant, le forcent à utiliser des expressions quantitatives pour exprimer des faits qualitatifs;
- l'« impédance » de transformation : la conséquence du manque d'une description adéquate, qui vient d'être mentionnée, est que les systèmes de raisonnement spatial orientés vers des approches numériques devraient effectuer une transformation directe et inverse entre leur représentation interne et la représentation accessible par un utilisateur humain. Pendant ces transformations des informations peuvent être perdues.

La conception de scène peut être considérée comme un problème de résolution et satisfaction de contraintes géométriques. Les contraintes sont attachées aux propriétés des composantes-primitives des scènes et décrivent les états de consistance possible. On constate un certain manque de rigueur dans la terminologie des contraintes géométriques. La diversité des taxonomies des types de contraintes est définie selon les objectifs du domaine d'application. Une contrainte géométrique porte sur un ou plusieurs paramètres géométriques d'un objet ou d'un groupe d'objets. Les contraintes peuvent être vues aussi comme des dimensions explicites de distances et d'angles et des relations 2D d'orthogonalité, d'incidence, de tangence, de concentricité et de rayon prescrit.

La conception par contraintes est en effet étroitement liée avec la conception d'objets paramétriques. Un objet paramétrique est le modèle d'un solide, dont la forme est donnée par une équation algébrique définie par des paramètres associés aux points spécifiques

(Nguyen, 94a). À l'aide des contraintes géométriques, le concepteur peut définir de manière descendante les relations entre les paramètres des objets. L'exploitation de la notion de résolution de contraintes dans les modeleurs géométriques et dans les modeleurs déclaratifs est un courant relativement récent. Dans ces modeleurs les primitives géométriques sont positionnées les unes par rapport aux autres en utilisant des paramètres et en imposant des contraintes. Dans (Nguyen,94a) on trouve un synthèse sur les caractéristiques et les tendances dans le développement de systèmes à contraintes pour la CAO.

Nous nous inspirons plus de classification faite par Martini dans le domaine du bâtiment (Martini,95) et nous classifions les contraintes comme contraintes de forme, contraintes d'allocation spatiale et contraintes mixtes. Le premier type définit les contraintes géométriques entre les composants d'un objet, le deuxième les contraintes sur les relations d'allocation spatiale des éléments d'un assemblage et le troisième est une combinaison entre les deux premiers types, c'est-à-dire le changement des paramètres affecte la forme et aussi la connexion de plusieurs objets. Dans ce dernier cas les contraintes 3D sont partagées dans un graphe hiérarchique. Pour chaque type de contrainte à un niveau hiérarchique est créé un échantillon appelé agrégation de positionnement ayant comme des arguments des paramètres du niveau inférieur. Une agrégation supporte deux types de contraintes géométriques : locales et globales. Le principe de construction de la hiérarchie est la réduction du niveau du degré de liberté géométrique d'une primitive et la généralisation en utilisant de variables.

Un certain nombre de recherches, portant sur des approches qualitatives, appliquées à différents aspects du raisonnement spatial, sont décrites dans la littérature. Nous allons brièvement passer en revue celles qui nous semblent les plus pertinentes du point de vue de la formalisation et de la représentation des connaissances spatiales

## 2.1 La physique naïve

J. Hayes (Hayes,79) propose des outils et une méthodologie permettant de modéliser une partie des connaissances de sens commun sur le monde physique quotidien: forme, espace, mouvement, substance (liquide et solide), temps, etc. Cette construction, nommée physique naïve, veut aller à l'encontre du *monde des jouets* habituellement étudié par l'intelligence artificielle. Elle consiste à construire des formalismes représentant la connaissance des phénomènes physiques. L'auteur s'intéresse à définir les caractéristiques que devra revêtir la formalisation obtenue: largeur (couvrir tout le domaine), densité (un petit nombre de concepts primitifs devra pouvoir représenter un grand nombre de faits) et uniformité du système de représentation formelle (la logique de premier ordre). Il identifie ensuite des groupes (*clusters*) de concepts reliés par affinités.

On trouve notamment un premier groupe « Places et positions » de concepts représentant l'espace à grande échelle (division de l'espace tridimensionnel en parties possédant une autonomie permettant de considérer un événement comme local à cette partie). Pour permettre la représentation du contact entre objets, l'auteur propose, à partir de la notion de face d'objet, de s'intéresser aux portions d'espace (arbitrairement fines) bordant cet objet. Les formalismes de représentations comprennent des symboles et un ensemble d'axiomes intégrant ces symboles. Une théorie donnée met en évidence, pour chaque concept manipulé, un ensemble de situations ou des faits dans lesquelles celui-ci intervient. Cette théorie est définie comme *le rapport des concepts aux divers faits qu'ils permettent d'exprimer*. Plus un symbole est présent dans les axiomes, plus il est en relation avec les autres symboles de la théorie. Le défaut dans cette théorie est la difficulté de trouver un état d'équilibre (ou fermeture conceptuelle) dans lequel la théorie possède les symboles et les axiomes nécessaires et suffisants pour décrire tous les phénomènes étudiés. L'ajout de tout nouveau concept ou symbole remet en cause cette fermeture et il faut définir de nouveaux axiomes.

Une position est définie comme un point dans un sous-espace, défini par ces coordonnées dans ce sous-espace, ce système de coordonnées n'étant pas forcément cartésien. Il distingue la notion « localisation » et « placement ». On peut se trouver à une position mais dans un lieu, celui-ci borné. Une position est un point dans le système de coordonnées du sous-espace, mais son intérieur peut être lui aussi un lieu avec son propre système de coordonnées, dans lequel on peut localiser d'autres positions. Ce ensemble de concepts concerne le découpage de l'espace en parties bien délimitées, et requiert une description du passage d'un lieu à un autre. Il couvre les concepts tels qu'intérieur, extérieur, passage, limite, contenant, etc. Il définit un *cluster* (groupes de concepts) comme étant à la base de nombreux phénomènes de causalité : le fait d'être dans un lieu isole des influences causales opérant à l'extérieur, et empêche celles de l'intérieur de se propager vers l'extérieur. Il a défini un deuxième groupe « Espaces et objets » concernant les concepts de l'espace entre et autour des objets solides (espace à petite échelle). Ce groupe couvre les relations entre les solides et leurs surfaces, ainsi que les rapports des bords d'une surface avec celle-ci. Les concepts manipulés sont : haut, bas, côté, bord, contour, avant, arrière. Il est possible de décrire la forme d'un objet à l'aide de ce *cluster* en faisant abstraction de sa position et son orientation.

## 2.2 L'espace de sens commun

Dans (Hobbs,85), l'auteur remarque que notre capacité à conceptualiser le monde selon des granularités différentes est un point essentiel de notre faculté de raisonnement : elle permet de projeter la complexité de ce monde dans des théories simples et calculables. Des théories locales doivent alors être reliées entre elles au moyen « d'axiomes d'articulation » qui permettent le changement de perspective. En partant de l'hypothèse

que le domaine d'étude, quelle que soit sa complexité, est représenté dans une théorie logique du premier ordre, l'auteur se propose d'extraire des théories du domaine des théories locales, plus réduites et plus simples. Il s'agit de s'intéresser à une restriction de l'ensemble des prédicats, le sous-ensemble des prédicats pertinents pour la situation courante.

Fleck (Fleck, 87) nous propose une nouvelle approche pour représenter l'espace en vue du raisonnement pratique. L'auteur distingue les descriptions symboliques (il y a un bureau contre le mur) des « modèles concrets » (constitués d'ensemble de points de  $R^3$ ). Elle remarque qu'on ne peut parfois vérifier la consistance d'une description symbolique qu'en exhibant un modèle qui la satisfasse. Elle s'intéresse alors à la définition d'un type de modèle concret qui, contrairement à  $R^3$ , utilise une densité finie d'échantillons. Ce modèle permet un arrangement irrégulier de ces échantillons, et contrairement à  $Z^3$ , autorise des notions de continuité de fonction et de connexion entre régions.

Le sens que nous associerons au terme « conception » est l'action de créer une représentation mentale et abstraite d'un objet. En général, les outils CAO imposent au concepteur d'abord un travail de décomposition de l'objet complexe en éléments géométriques simples, puis le travail de reconstruction i.e. d'assemblage de ces éléments. Les aspects spatiaux sont présentés dans les nombreux domaines de la CAO. La modélisation architecturale, par exemple, consiste dans un passage de l'image mentale de l'architecte à un objet géométrique. L'architecte souhaite aussi que, le temps du processus de décomposition /assemblage soit le plus court possible. Une nécessité pour la CAO en architecture est d'assurer la production d'une représentation des savoir et savoir-faire du concepteur. Une telle représentation est réduite à: un modèle d'objets, un modèle de calage et un modèle de composition (Quintrand, 91).

Le *modèle d'objets* a pour fonction de décrire les objets élémentaires (objets abstraits) ou éléments d'architecture, constituant l'univers modélisé. La conception architecturale est décomposée en plusieurs niveaux : esquisse, avant projet sommaire, avant projet détaillé et détail. A chaque niveau les objets manipulés sont différents.

Le *modèle de calage* est chargé de gérer les relations d'adjacence entre objets ou entre objets référents. Ce modèle s'appuie essentiellement sur la notion de référentiel, c'est-à-dire un système qui met en relation des référents et des références. Un élément est toujours positionné en fonction d'un autre qui devient à son tour référent du suivants. Les relations de calage peuvent aussi faire intervenir le référentiel absolu de la scène (repère orthonormé  $O_{xyz}$ ), afin d'imposer une position fixe à un objet architectural dans la scène.

Le *modèle de composition* a pour fonction de localiser des ensembles d'objets ou de faire des opérations de transformations géométriques sur ces objets selon des règles fixées par l'utilisateur ou par un modèle normatif qui connaît le système. Ce modèle permet

d'agir sur des ensembles d'objets obéissant aux mêmes règles, telles que si la valeur d'un paramètre change, les valeurs des paramètres correspondant sur les autres objets changent aussi (Quinrand&al,85). La description d'une scène d'objets spatiaux inclue des propriétés caractéristiques inhérentes à chaque objet et au contexte des autres objets. Ces descriptions ne réfèrent pas à un espace absolu et orthonormé: il s'agit plutôt d'un espace de perception, un espace cognitif dont la structure repose en grande partie sur les aspects fonctionnels et symboliques des objets décrits, et sur le point de vue du locuteur. Ces caractéristiques concernent la topologie (trous et limites) et l'extension (taille et forme) de l'objet. Par rapport aux autres objets constituant le contexte de la scène, ces caractéristiques sont des relations de positionnement relatif, d'orientation et topologiques.

### **3. Représentation qualitative de l'espace**

La représentation qualitative de l'espace est une représentation où l'espace est décrit à l'aide de relations entre les différents objets qui y sont présents. Pour se donner une telle représentation, on fait appel au sens cognitif du terme espace. La question est de savoir comment l'homme se représente l'espace car l'homme utilise sa propre représentation de l'espace. En s'inspirant des travaux de Freksa (Freksa,91) Hernandez (Hernandez,95) a défini les propriétés des représentations qualitatives :

- les représentations qualitatives font uniquement les distinctions nécessaires pour identifier des objets dans un contexte donné ;
- elles reflètent un arrangement réel des valeurs et non une information absolue sur ces valeurs;
- elles sont sous-déterminées, dans le sens où elles peuvent correspondre à plusieurs situations réelles;
- elles s'accroissent avec une connaissance vague par l'utilisation de niveaux de granularité grossiers qui évitent l'emploi de valeurs précises. Si la connaissance se précise, il y a un raffinement des données;
- elles sont indépendantes d'une granularité particulière;
- le contenu des relations qualitatives est variable. Certaines décrivent ce qui correspond à un domaine large de valeurs quantitatives, d'autres peuvent référer une valeur distinctive unique;
- elles induisent une similarité structurelle entre le monde représentant et le monde représenté, évitant ainsi la violation des contraintes relatives aux propriétés de base du monde représenté.

Pour obtenir des descriptions qualitatives des positions des objets, l'auteur identifie deux classes de relations spatiales :

- huit relations topologiques (disjoint, tangent, overlaps, included-at-border, included, contains-at-bordered, contains, equal);
- huit relations d'orientation.

L'auteur se propose alors de combiner ces deux classes de relations pour produire un modèle d'orientation qui tient compte de l'extension des objets. Il décrit un ensemble d'algorithmes originaux mettant en œuvre l'utilisation de la structure de l'espace pour le raisonnement spatial, utilisé dans deux cas : la création d'une représentation à partir d'une configuration spatiale et la visualisation d'une représentation spatiale. Nous adoptons comme des primitives de positionnement spatial les concepts de relations d'orientation, de distance et de taille des objets composants (Clementini, 97). La distance est intuitivement liée à une approche quantitative (absolue ou relative), l'orientation à une approche qualitative (rose des vents). Les formalismes de représentation des connaissances de positionnement y sont classés en deux catégories principales : les connaissances de *chemin (route)* et ceux de *guide (survey)*.

La connaissance de chemin est constituée d'information locale: les ordonnancements connus entre les points de la scène. La connaissance de guide représente une vue de toute la scène par rapport à un repère global. L'orientation et la distance peuvent être de trois types: *égocentrique* i. e. par rapport à un observateur, *allocentrique* i. e. par rapport à la structure de référence ou *géocentrique* i.e. par rapport au système de coordonnées. Mais d'autres facteurs peuvent aussi influencer l'orientation et la distance : la taille, le point de vue, etc. Il nous est donc apparu comme insuffisant leurs modélisations par des relations isolées.

Nous inspirant du travail de (Clementini & al., 97), nous introduisons le concept de cadre de référence d'un objet CRO (*frame of reference*). Les relations d'orientation décrivent les placements des objets les uns par rapport aux autres selon les rôles basiques de cible, objet de référence et l'appartenance à un cadre de référence.. Le concept de cadre de référence (*frame of referene*) était introduit par (Climentini & al, 97). L'orientation de l'objet cible est exprimée par rapport à l'objet de référence, lui même déterminé par le cadre de référence. Nous pouvons qualifier les relations *non orientées* comme des relations topologiques.

#### 4. Représentation de l'espace basée sur des intervalles

Les travaux concernant la représentation qualitative de l'espace ont essayé de reproduire une ontologie semblable de l'espace. Ces travaux ont tenté d'étendre cette représentation par l'adaptation de relations qui proviennent d'un espace de dimension 1 à un espace de dimension 2 ou 3. Les unités abstraites temporelles deviennent des unités abstraites spatiales. Les méthodes de représentation de l'espace basées sur des intervalles

consistent à représenter les objets par des intervalles et à comparer la position de ces intervalles.

Dans le formalisme d'Allen, un intervalle  $I$  est une entité atomique, indécomposable. Cette connaissance qualitative peut être traduite en terme des relations entre intervalles. Les intervalles représentent la durée de vie de l'objet considéré. Mais il est possible de représenter un intervalle par le couple de ces extrémités  $(I_G, I_D)$ , vérifiant  $I_G$  (ou  $I'$ )  $<$   $I_D$  (ou  $I''$ ),  $I_G$  (ou  $I'$ ) et  $I_D$  (ou  $I''$ ) comme étant respectivement, l'extrémité gauche et l'extrémité droite de l'intervalle  $I$ . Pour les besoins de l'exposé l'ensemble des intervalles sera noté  $EI$ .

Entre deux intervalles dont on ignore la longueur, il y a 13 relations possibles d'interpositionnement (figure 1). L'ensemble de ces treize relations sera nommé  $R_{Allen}$ , et chacune peut être définie en précisant les relations arithmétiques ( $\{<\}, \{=\}, \{>\}, \{<,\}=\}, \{<,\}>\}, \{<,\}=\}>\}$ ) sur les extrémités des intervalles. Aucune métrique n'est considérée sur cet ensemble. Les treize relations sont disjointes et forment une partition de la relation universelle. Une formule atomique  $I_1 r I_2$  est satisfaite par une interprétation si et seulement si l'interprétation des intervalles  $I_1$  et  $I_2$  satisfait les relations sur les extrémités définies dans le tableau. Le nombre total de relations considérées est alors de  $2^{13}$  c'est-à-dire le nombre d'applications d'un ensemble de 13 éléments dans un ensemble de 2 (soit on prend la relation, soit on la laisse de côté dans la disjonction). Cet ensemble noté  $A$  contient la relation vide insatisfaisable de la relation universelle  $= \cup_{R_{Allen}} r$ .

Sur les  $2^{13}$  relations Allen a défini une algèbre connue comme «algèbre des intervalles d'Allen». Cette algèbre contient trois lois de composition interne: une loi d'inversion (notée  $r^{-1}$ ), une loi additive, l'intersection de deux relations (notée  $\cap$ ), et une loi multiplicative, la composition de deux relations (notée  $\circ$ ). L'intersection est de type ensembliste classique, c'est-à-dire l'intersection  $R_1 \cap R_2$  de deux relations. Cette opération consiste en les relations communes atomiques aux deux relations  $R_1, R_2$ . La composition de deux relations atomiques se donne par la table de composition  $13 \times 13$  (voir la figure 1).

Relation atomique (vocabulaire)	Relation atomique inverse (vocabulaire)	Sb	SbI	Signification graphique	Relation sur les extrémités
X before Y X avant Y	Y after X Y après X	b	bi	x(y) — y(x) —	$X < Y, X < Y^+$ $X^+ < Y, X^+ < Y^+$
X meets Y X touche Y	Y met by X Y touché par X	m	mi	x(y) y(x) —————	$X < Y, X < Y^+$ $X^+ = Y, X^+ < Y^+$
X overlaps Y X recouvre Y	Y overlapped by X Y recouvert par X	o	oi	x(y) — y(x) —	$X < Y, X < Y^+$ $X^+ > Y, X^+ < Y^+$
X starts Y X débute Y	Y started by X Y débuté par X	s	si	x(y) — y(x) —	$X = Y, X < Y^+$ $X^+ > Y, X^+ < Y^+$
X during y X contains y	Y contains X Y contains X	d	di	x(y) — y(x) —	$X > Y, X < Y^+$ $X^+ > Y, X^+ < Y^+$
X finishes y X termine y	Y finished by X Y terminé par X	f	fi	x(y) — y(x) —	$X > Y, X < Y^+$ $X^+ > Y, X^+ = Y^+$
X equal Y X égal à Y	Y equal X Y égale à X	eq	eq	x(y) — y(x) —	$X = Y, X = Y^+$ $X^+ = Y, X^+ = Y^+$

Figure 1. Vocabulaire des 13 relations canoniques d'Intervalle d'Allen et l'extension sur les extrémités

L'algèbre d'Allen est définie de la manière suivante:

$$\forall I_1, I_2 \in I, \forall r \in A$$

$$I_1 r I_2 \leftrightarrow I_2 r I_1;$$

$$I_1 (r \cap s) I_2 \leftrightarrow I_1 r I_2 \wedge I_1 s I_2;$$

$$I_1 (r \circ s) I_2 \leftrightarrow \exists I_3, I_1 r I_3 \wedge I_3 s I_2;$$

où  $\wedge$  est un «ET» logique

De ces définitions, il résulte que l'inverse d'une disjonction est égal à l'intersection ensembliste des relations atomiques de chacune des deux relations (parce que les treize relations atomiques sont disjointes deux à deux) et que la composition de deux relations est égale à l'union de toutes les compositions d'un élément de la première relation avec un élément de la seconde. La composition de deux relations de  $R_{Allen}$  est déterminée en

regardant les relations sur les extrémités et Allen en donne la table détaillée pour les  $13 \times 13$  compositions possibles (voir la figure 1). L'élément  $(r_1, r_2)$  de la table donne la relation entre deux intervalles  $X$  et  $Y$  qu'on peut déduire si l'on connaît les contraintes  $C_1$  et  $C_2$  liant ses deux intervalles à un troisième (la relation  $r_1$  entre  $X$  et  $Z$ , et la relation  $r_2$  entre  $Z$  et  $Y$ ). La loi de composition (composition de 2 contraintes) se donne par la formule suivante :

$$C(X, Y) = C_1(X, Z) \circ C_2(Z, Y) = \bigcup_j \alpha_j \mid \beta_j \text{ . } r_i \text{ . } r_j(X, Z) \circ r_j(Z, Y)$$

La composition de deux relations de A peut alors être calculée grâce à cette table en utilisant la propriété de distributivité de la composition sur l'union (Ladkin,90). L'opération Inverse  $R^{-1}$  d'une relation d'Allen est donnée sur la figure 2. Il est clair que l'inconvénient d'un tel procédé est qu'il nécessite de recalculer la composition de relations qui pourraient être mises dans une table si celle-ci ne demandait pas autant de place ( $2_{13} \times 2_{13}$ ) (Ladkin&al.92).

Les concepts d'intervalles sont associés de manière naturelle directement aux phénomènes perçus dans des périodes de temps. Analogiquement, un objet possédant une forme géométrique peut être définie par l'association à leurs extrémités des instants du temps. Les extrémités de l'objet possèdent un ordre fixe qui peut être représenté par une séquence d'instant temporels. Les dimensions d'une boîte, englobant la forme de l'objet, peuvent être définies par les intervalles spatiales. Ces intervalles sont limités par les extrémités de la forme dans chacune des directions de l'espace, orthogonales du son repère. Dans ce cas nous considérons les intervalles spatiales comme étant complètement isomorphes aux intervalles temporelles.

On distingue des intervalles convexes et non convexes. Les intervalles d'Allen sont convexes (Beek&Manchak96; Bouzid,95). Un intervalle convexe représente une période de temps continue. Lorsque les intervalles convexes sont construits sur les ensembles de points, ils représentent des ensembles convexes de points à une dimension. Un intervalle non convexe est un ensemble d'intervalles convexes dont chaque élément est appelé composante ou sous-intervalle.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		<b>b</b>	<b>bi</b>	<b>d</b>	<b>di</b>	<b>o</b>	<b>oi</b>	<b>m</b>	<b>mi</b>	<b>s</b>	<b>si</b>	<b>f</b>	<b>fi</b>
1	<b>b</b>	b	I	Mds	b	b	Mds	b	Mds	b	b	Mds	b
2	<b>b</b> <b>i</b>	I	bi	Ndf	bi	Ndf	bi	Ndf	bi	Ndf	bi	bi	bi
3	<b>d</b>	b	bi	d	IL	Mds	Ndf	b	bi	d	Ndf	d	Mds
4	<b>d</b> <b>i</b>	M di fi	N di si	K	di	di o fi	di oi fi	di o fi	di o fi	di o fi	di	di oi si	di
5	<b>o</b>	b	N di si	d o s	M di fi	M	K	b	di oi si	o	di o fi	d o s	M
6	<b>o</b> <b>i</b>	M di fi	bi	d oi f	N di fi	K	N	di o fi	bi	d oi f	N	oi	Di oi si
7	<b>m</b>	b	N di si	d o s	b	b	d o s	b	eq f fi	m	m	d o s	b
8	<b>m</b> <b>i</b>	M di fi	bi	d oi f	bi	d oi f	bi	eq s si	bi	d oi f	bi	mi	mi
9	<b>s</b>	b	bi	d	M di fi	M	d oi f	b	mi	s	eq s si	d	M
10	<b>si</b>	M di fi	bi	d oi f	di	di o fi	oi	di o fi	mi	eq s si	si	oi	di
11	<b>f</b>	b	bi	d	N di si	d o s	N	m	bi	d	N	f	eq f fi
12	<b>fi</b>	b	N di si	d o s	di	o	di oi si	m	di oi si	o	di	eq f fi	fi

Figure 2. Relations de composition d'intervalles d'Allen

IL= l'ensemble de toutes les relations de base {eq, b,bi,m,mi,o,oi,d,di,s,si,f,fi}

K = {eq, d, di, s, si, f, fi, o, oi } M = {b, o, m } N = { bi, oi, mi }

K = {eq, d, di, s, si, f, fi, o, oi } M = {b, o, m } N = { bi, oi, mi }

<b>C</b>	eq	b	bi	d	di	o	oi	mi	mi	s	si	f	fi
<b>C'</b>	eq	bi	b	di	d	oi	o	m	m	si	s	fi	f

Figure 3. Relations inverses

Dans ce formalisme, la conjonction de *k*- contraintes  $IR_1 J, IR_2 K, \dots, IR_k J$  sur la même paire d'intervalles  $(I, J)$  est équivalente à l'unique contrainte  $(IR J)$ , avec  $R = \cap R_i, i=1, k$ .

Les problèmes typiques de raisonnement qui se posent alors sont les suivants :

À partir d'un ensemble de formules  $\_$ ,

1. Déterminer s'il existe un modèle de  $\_$  (problème de satisfaisabilité) ;
2. Déterminer pour chaque couple d'intervalles  $I_1, I_2$  la relation la plus forte impliquée par  $\_$ , c'est-à-dire l'ensemble  $R$ , le plus petit tel que  $\_ \Delta \bar{O} (I_1 R I_2)$  (problème de fermeture déductive (Vilain&al,86) ou d'étiquetage minimum (VanBeek,90b) ;

Golumbic et Shamir (Golumbic&al,93) ajoutent à ces deux problèmes un autre plus général encore qui consiste à trouver toutes les solutions consistantes, puisque cet ensemble est différent de l'énumération du produit cartésien des solutions du problème précédent

Étant donné que la résolution de ces deux problèmes est dans le cas général difficile, des sous-ensembles de  $A$  ont été définis pour les rendre solubles en temps polynomial. Du fait de l'isomorphie entre un intervalle temporel et une structure spatiale monodimensionnelle, la définition des relations spatiales monodimensionnelles est immédiate. Ainsi, un ensemble de relations spatiales monodimensionnelles entre plusieurs objets sera représenté par un graphe d'objets reliés entre eux par des arcs, exprimées dans la logique d'Allen. Le passage d'un modèle monodimensionnel à un modèle pluridimensionnel consiste à définir une relation spatiale dans un espace de dimension  $\langle n \rangle$  comme un  $n$ -uplet de relations spatiales monodimensionnelles.

Le système **Archipel**, par exemple, a pour but de proposer un avant-projet sommaire à partir d'un organigramme fonctionnel (Maculet,91). Il s'intéresse au placement des parallélépipèdes rectangles aux bords parallèles aux axes dans un espace discret de dimensions fixes. Les contraintes spatiales manipulées (voir la figure 4) sont définis dans le plan horizontal, à l'aide de six contraintes exprimées dans la logique d'Allen. Les contraintes numériques sont exprimées dans un espace discret, soit des inéquations linéaires de type longueur ou distance, soit des contraintes de surface. Un système basé sur des conjonctions et de disjonctions d'inéquations est ainsi obtenu, qui regroupe à la fois les contraintes topologiques et numériques. La solution (ou ensemble de solution) est obtenue en utilisant des heuristiques et des techniques de propagation de contraintes afin de réduire la complexité du problème.

Donikian (Donikian,95) a développé une méthode descriptive de conception d'esquisses d'environnement architecturaux. La résolution est basée sur la coopération entre deux technique d'inférence: une inférence logique issue de la logique d'Allen (Allen,83) et une inférence numérique basée sur un algorithme d'optimisation sous contraintes. Malgré les bons résultats pratiques, l'implémentation de l'approche nécessite un temps du calcul assez élevé. En plus chaque modification doit recalculer tout depuis le début.

Mukerjee et Joe (Mukerjee&al,90) définissent un modèle utilisant la logique des intervalles de Allen. Il construit une carte dans un espace bidimensionnel, basée sur les relations qualitatives locales entre objets. Ces relations ont été utilisées pour la construction d'un modèle géométrique qualitatif afin de planifier le déplacement d'un

robot mobile. À chaque objet dans l'espace est associé un système de deux axes orthogonaux, basé sur la direction de déplacement de l'objet ou sur le frontal de ce même objet, ce qui définit quatre directions principales (devant, à gauche, à droite, derrière) ainsi que quatre quadrants. Une relation spatiale entre deux objets  $A$  et  $B$  possède deux attributs: une direction relative (angle interne) et un positionnement relatif. Les relations angulaires définissent deux lignes de déplacement qui délimitent une zone accessible par l'objet au cours de déplacement en translation. Ces deux lignes sont parallèles car elles s'appuient sur une boîte englobante déterminée par rapport au frontal. La relation spatiale entre deux objets est exprimée par un ensemble de trois informations :

1. La valeur dans le quadrant de la direction de l'objet  $A$  par rapport à l'objet  $B$ ;
2. La position de l'objet  $A$  par rapport à l'objet  $B$ ;
3. La position de l'objet  $B$  par rapport à l'objet  $A$ .

Nous ajoutons des notions métriques à la représentation basée sur des intervalles. Ainsi notre approche se détache des représentations qualitatives et permet de donner une représentation hybride qualitative - quantitative.

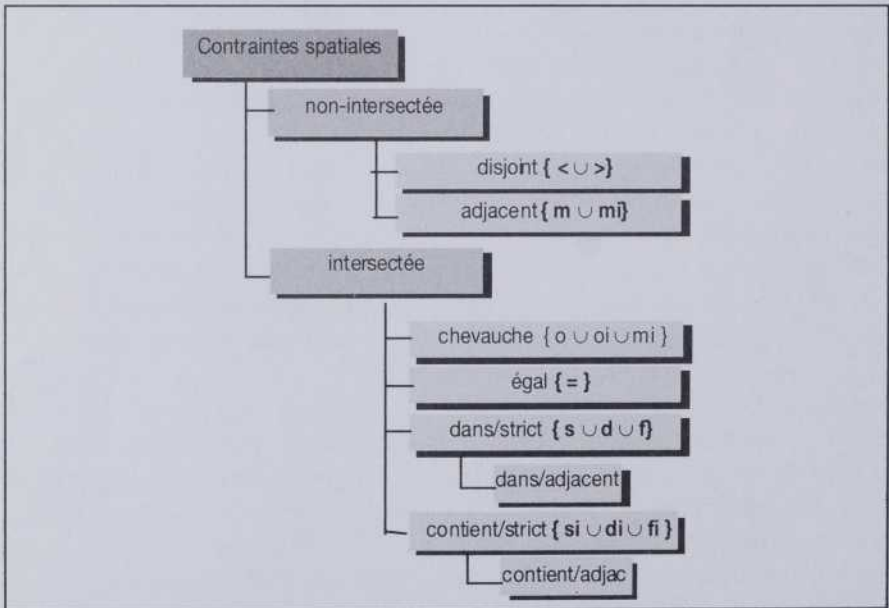


Figure 4. Hiérarchie des contraintes spatiales d'après (Maculet, 91)

## 5. Modélisation spatiale hybride

Nous adoptons dans ce travail l'hypothèse énoncée dans (Charman,95). Résoudre une contrainte spatiale ou locative c'est tout d'abord placer des objets dans l'espace, par rapport à un repère: absolu ou relatif. Dans cette perspective nous proposons, un modèle hybride (qualitatif-quantitatif) de positionnement déclaratif d'objets 3D. Ce modèle est destiné à être le support d'une méthode de résolution de configurations spatiales en conception déclarative de scènes. Son objectif est la représentation et la déduction du positionnement d'un ensemble d'objets fondés sur les localisations décrites en termes de concepts spatiaux.

Pour la localisation d'un objet, nous empruntons la notion classique de boîte englobante (Donikian, 95), en tant que *meta* objet, un solide sous forme de parallélépipède isothétique 3D et de rectangle 2D. La boîte englobante est positionnée dans un octant, obtenu par la subdivision arborescente de l'espace (boîte initiale de la scène) en sous-espaces (*octants*) par la méthode octree (Foley,90), jusqu'au niveau de détail souhaité. L'octant d'accueil détermine l'orientation de la boîte de l'objet cible à positionner par rapport au repère fixé au centre du volume initiale et l'observateur devant lui (Figure 5). Les domaines des valeurs des paramètres de positionnement de l'objet cible se réduisent aux intervalles cohérents, obtenues par résolution. Le calcul de ces paramètres pour la cible s'effectue pas à pas en modifiant consécutivement chacune des valeurs des paramètres de l'objet de référence, étant des éléments d'une base de connaissance de type classificatoire. Ceci évite la résolution simultanée de grands systèmes d'inéquations.

Les notions spatiales ont un caractère propre que la logique classique ne traduit pas. Nous proposons un modèle hybride de positionnement d'un ensemble d'objets 3D, représentés par des modèles de solides, fondé sur des descriptions de localisation et des contraintes spatiales. La question qui se pose est comment décrire de manière naturelle l'endroit cible dans l'espace de la scène 3D. L'idée de base est d'attacher les coordonnées et les contraintes des objets à positionner aux boîtes englobantes. Cela permet de les identifier en termes de classes de sous espaces obtenus par la subdivision du volume de la scène initiale de manière arborescente par la technique octree (Foley,90;Mäntylä,88). La profondeur et les dimensions des cellules obtenues sont déduites par la résolution des contraintes spatiales qualitatives et quantitatives.

Les relations quantitatives représentent des contraintes numériques, le plus souvent les distances, qui peuvent être facilement traduites dans un formalisme de réseau simple de contraintes numériques (distances entre des objets). Le raisonnement sur le positionnement en termes d'intervalles est assimilé à un problème de satisfaction de contraintes. Les contraintes sont définies sur chaque axe de coordonnées en termes de relations d'Allen. Le modèle hybride proposé est caractérisé par les trois concepts

suivants: une description qualitative et quantitative des contraintes spatiales; des objets à positionner, appelés cible; les objets de référence, référence et cadres de référence *CRO*. Nous présentons ce modèle dans la section suivante.

### 5.1 Description et représentation des contraintes spatiales

Les relations spatiales (topologiques) sont invariantes par translation, rotation, agrandissement et rétrécissement. Par conséquent, elles sont indépendantes de l'orientation des objets.

Les relations locatives permettent de définir le positionnement relatif des objets dans la scène, soit en rajoutant une relation locative à la description, soit en effectuant un raffinement du positionnement connu. La description des objets à positionner est décrite dans un langage simplifié, constitué de concepts de positionnement. Enfin, les contraintes de distance sont associées aux relations entre les objets.

Les contraintes spatiales sont étudiées par rapport aux trois plans orthogonaux définis par le corps humain (Mukerjee,96;Donikian, 95) et l'environnement dans lequel il évolue : le plan frontal qui partage le corps en une partie avant et une partie arrière suivant l'axe frontal *Z*, le plan sagittal qui partage le corps en une partie gauche et une partie droite symétrique suivant l'axe latéral *X*, et le plan transversal qui partage le corps en une partie basse et une partie haute suivant l'axe vertical. Une contrainte spatiale est ainsi latérale (suivant l'axe des *X*), verticale (suivant l'axe des *Y*) ou frontale (suivant l'axe des *Z*). Une taxonomie des relations d'orientation et du volume qu'elles définissent, peut être dérivée à partir de relations de trois points dans le plan appelés point d'observation, point cible et point de référence. L'espace est discrétisé consécutivement au découpage des 3 plans orthogonaux du repère de coordonnées cartésiennes. On obtient différents niveaux d'orientation spatiale dénotés par un vocabulaire particulier *spatial*. Deux cas sont possibles pour la description des relations spatiales qualitatives de positionnement exprimées par un couple d'objets (cible, référence) par rapport aux axes du système de coordonnées où nous avons choisi le type main gauche, c'est-à-dire l'axe *Z* pointe dans son sens positif de l'observateur vers la profondeur de l'écran (Figure 5).

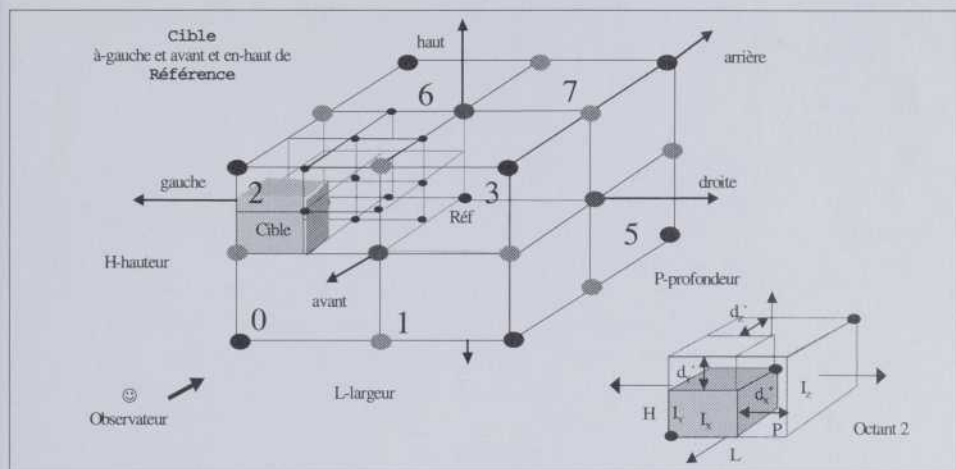


Figure 5. Représentation de relations topologique d'une configuration

Le premier cas utilise six contraintes d'orientations exprimées par le vocabulaire gauche-droite pour largeur, bas-haut pour la hauteur et devant-derrrière pour la profondeur associée aux axes orthogonales  $X, Y, Z$ . Dans le deuxième cas, on décrit une relation d'orientation intrinsèque qui dépend d'un repère triaxial (*frontal, latéral et vertical*). En d'autres termes, la localisation de l'objet cible ne dépend que du cadre de référence et de celui qui détermine l'interprétation de la relation d'orientation. La relation d'orientation est définie par la conjonction logique des relations sur les trois directions orthogonales gauche-droite, bas-haut, devant-derrrière associées aux axes  $X, Y, Z$ . Il existe de nombreuses autres contraintes spatiales pour positionner un objet par rapport à un autre. En effet, un objet peut être collé-à, orienté en diagonale, etc. Pour ce type de contraintes on utilise des relations et des méthodes de résolution quantitatives.

## 5.2 Objets à positionner

Chaque objet à positionner à l'intérieur d'une scène est représenté par une primitive géométrique 3D de solide, simple ou composée, possédant des caractéristiques sémantiques (type géométrique, configuration spatiale, aspect, méthodes, etc.). Par exemple, l'objet *sphère de bois vert* est une primitive simple mais *roue noire aplatie positionnée à gauche de la sphère* est une structure obtenue par l'intersection d'une boîte et d'une sphère, déformée selon les proportions *moins haut que large et profond*. Chaque objet cible d'une scène est défini dans son propre repère d'axes de coordonnées, mais le

positionnement s'effectue en utilisant des relations spatiales (cible, référence) par rapport aux axes du repère global de la scène.

### 5.3 Boîte englobante

Une boîte englobante d'un objet joue le rôle d'emballage pour transporter l'objet à un endroit précis. C'est le plus petit parallélépipède rectangle contenant l'objet. Définir des objets de la scène par ses boîtes englobantes présente des avantages et de limites. L'avantage principal est la possibilité de faciliter l'accès aux primitives positionnées, l'inconvénient majeur est dû à l'approximation inhérente de l'objet par sa boîte ce qui nécessite des opérations de raffinement. Une boîte englobante d'un solide est aussi un solide, considéré comme *meta objet*. Leurs faces sont orientées parallèlement aux axes du repère local et leurs dimensions sont largeur-L, hauteur-H et profondeur-P. Les coordonnées des deux extrémités  $min(x,y,z)$  et  $max(x,y,z)$  spécifient la position exacte de chaque boîte englobante dans son repère local (Figure 6)

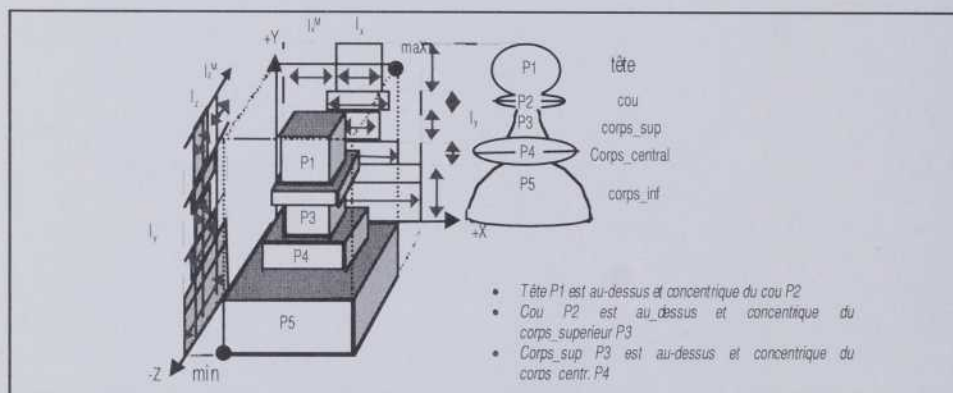


Figure 6. Représentation des paramètres spatiaux de la scène Pion

### 5.4 Subdivision de l'espace 3D et cadre de référence

Généralisant la décomposition dichotomique du plan par *quadtrees* (Cambray,94; Foley,90; Peroche,88), le modèle *octree* décompose l'espace 3D en huit octants identiques, chaque octant pouvant être subdivisé lui-même de façon récursive en huit sous-octants. La description se fait par un arbre dont chaque nœud interne possède exactement 8 fils. Le *cadre de référence* d'un objet à positionner est l'octant qui l'englobe

de manière optimale. Le cadre de référence permet aussi de représenter les objets à positionner de manière locale relativement aux objets voisins, en utilisant des expressions locales, appelées dans (Donikian,95) schémas. Ces schémas traduisent les relations suivant les trois axes usuels du corps humain : *latérale*, *frontale* et *verticale*. Les positions relatives et le raisonnement spatial se font sur les projections des composants le long des trois axes du cadre de référence.

### 5.5 Méthode de résolution

La méthode de résolution du positionnement doit donc trouver les adresses des octants valides dans l'espace, conformes à la description, permettant ensuite de calculer les coordonnées de la nouvelle position de l'objet cible. Les coordonnées de la position sont affectées aux points caractéristiques de l'objet cible, paramétrées et déterminées par rapport à celles de sa boîte englobante.

Le processus de résolution des contraintes spatiales repose sur deux étapes : une inférence logique qui détecte des incohérences de la description spatiale et fait la réduction des domaines des valeurs; et un algorithme numérique qui donne des solutions exactes ou génère des familles de solutions consistantes.

La première étape prend en compte les contraintes de positionnement relatif ainsi que les longueurs des segments composant les objets, et leurs espaces intermédiaires. Cette étape va permettre de vérifier la cohérence de la description locative des objets dans la scène, et va produire un système minimal d'équations (ou inéquations) linéaires, auxquelles peuvent être ajoutées s'il y a besoin des contraintes géométriques (inéquations non-linéaires). La deuxième étape prend en charge la résolution numérique incrémentale des équations, réduites à une inconnue par axe, (phase de résolution numérique expliquée plus loin). Au cours de cette résolution, des incohérences pourront être détectées et explicitées à l'utilisateur. Ces deux étapes contiennent *six phases*, décrites dans les sections suivantes (Figure 7).

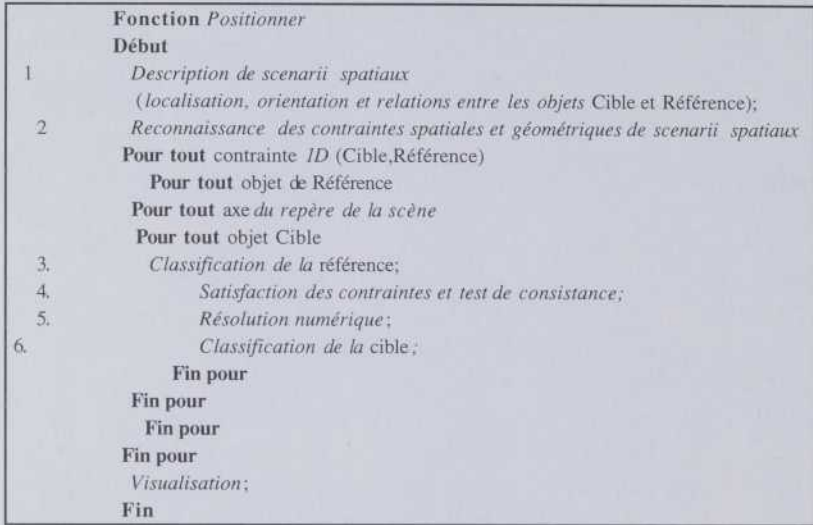


Figure 7. Méthode de résolution du positionnement d'une configuration spatiale en six phases

### 5.5.1 Description de scénarii spatiaux

Pendant la phase de description nous utilisons un langage naturel simplifié et une sémantique, qui permettent de décrire de manière déclarative les noms des objets cible et référence, le type de la relation locative et l'orientation du positionnement en termes de relations spatiales. La description comprend les contraintes inhérentes concernant l'orientation notée d'une part par les *ContrainteX*, *ContrainteY* et *ContrainteZ* et les dimensions des boîtes englobantes des objets  $L \times H \times P$ , et d'autre part en option par les distances  $dX$ ,  $dY$  et  $dZ$  entre l'objet et les bords de son cadre de référence qui l'englobe (voir Figure 5).

### 5.5.2 Reconnaissance des contraintes qualitatives et géométriques

Cette phase consiste à reconnaître dans la description des scenarii spatiaux, les concepts des relations qualitatives et quantitatives entre les différents objets de la scène puis à les mettre dans un format adapté au traitement correspondant. En général on traduit les intervalles en graphe de distances. La consistance d'un réseau de contraintes spatio-temporelles est un problème *NP*-complet. Si les contraintes sont réduites à un seul

intervalle au lieu de l'union des contraintes, la solution est en  $O(n^3)$ . L'algorithme de Floyd-Warshall calcule les distances des chemins les plus courts pour tous les couples de noeuds du graphe, et il peut vérifier la consistance du graphe.

Contrainte {cible, référence} {  
 ContrainteX(cible,référence),  $L \times H \times P$ , [dX(cible, référence)],  
 ContrainteY(cible,référence),  $L \times H \times P$ , [dY(cible, référence)],  
 ContrainteZ(cible,référence),  $L \times H \times P$ , [dZ(cible, référence)] }

La mise en relation des objets, ainsi que la construction des contraintes de positionnement, se fait par rapport aux boîtes englobantes de ces objets. Une boîte englobante est définie par l'ensemble de trois segments sur les axes X, Y et Z. Chaque segment est représenté par un couple de réels  $(I_x^-, I_x^+)$ ,  $(I_y^-, I_y^+)$ ,  $(I_z^-, I_z^+)$ , un réel pour chaque extrémité de début et de fin par axe (van Beek&al,90). On définit une *contrainte dite 3D* entre deux objets par la conjonction de trois contraintes *ID*, une pour chaque axe. Une contrainte *ID* est définie entre deux segments d'un même axe. On peut ainsi construire une contrainte *ID* comme disjonction d'un ensemble de relations d'Allen. Il existe donc  $2^{13}$  contraintes *ID* différentes entre deux segments d'un même axe. Une telle contrainte *ID* sera vérifiée si une au moins des relations qui la composent est vérifiée.

Il faut noter que deux segments déterminés ne sont liés que par une seule relation, mais on peut néanmoins vouloir contraindre le positionnement relatif de ces deux segments par une contrainte *ID* qui se définit par plusieurs relations de base. Par exemple la contrainte pour l'axe X en termes de relations élémentaires d'Allen entre l'objet 1(Roue1) et l'objet 4(le bord du CRO) de la (Figure 5) est exprimée par la *ContrainteX*, appelée contenu-X(1,4)={dx  $\cup$  sx  $\cup$  fx  $\cup$  =x} (1,4).

### 5.5.3 Classification de la référence

Durant cette phase, l'objet de référence est classifié par rapport au type du volume qui l'englobe. Il s'agit de rechercher et d'instancier la classe la plus spécialisée dans la hiérarchie des classes des types de volumes de subdivision, contenant la référence. Cette taxonomie de spécialisation est créée à l'aide de la méthode de subdivision de l'espace par octree (Foley,90). Le type d'un volume est caractérisé qualitativement par la description de son orientation spatiale par rapport aux 3 axes du repère de référence: gauche(g)-droit(d), haut(ha)-bas(b) et avant(av)-arrière(ar). De cette façon, le volume initial de toute la scène est décrit par la classe des volumes, définis par les intervalles  $I_{g-d}$ ,  $I_{b-h}$  et  $I_{ar-av}$ , correspondant respectivement à sa longueur, hauteur et profondeur. Cette classe est unique pour le type niveau initial de subdivision  $N_i = 0$ . Chacun de ces trois intervalles est constitué de deux sous intervalles égaux :  $I_{g-d} = I_g + I_d$ ,  $I_{b-h} = I_b + I_h$ , et  $I_{ar-av} = I_{ar} + I_{av}$ . Le volume initial ( $I_{g-d}$ ,  $I_{b-h}$ ,  $I_{ar-av}$ ) peut être décomposé en 8 octants par la subdivision de ces intervalles. On obtient :

$$\begin{aligned}
 I_{g-d}(NI) &= I_g(NI) + I_d(NI), & I_{b-ha}(NI) &= I_b(NI) + I_{ha}(NI), \\
 I_{ar-av}(NI) &= I_{ar}(NI) + I_{av}(NI) \\
 I_g(NI) &= I_d(NI) = I_{g-d}(NI+I), & I_b(NI) &= I_{ha}(NI) = I_{b-ha}(NI+I), & I_{av}(NI) \\
 &= I_{ar}(NI) = I_{av-ar}(NI+I),
 \end{aligned}$$

où  $NI$  est niveau de subdivision, ou la profondeur dans l'arbre de l'adresse du chemin spécifié.

De cette manière, nous pouvons indexer tous les octants du niveau suivant  $NI+I$  par un vocabulaire de six mots spatiaux, comme gauche-droite, haut-bas et avant-arrière. Nous construisons ainsi une taxonomie arborescente de spécialisation des octants obtenus à chaque niveau de subdivision du volume de la scène. Le volume d'un octant de chaque niveau de subdivision  $NI+I$  doit être inclut dans le volume de l'octant de son père du niveau précédent  $NI$ . Nous cherchons une convention, généralisant la notation de tous les octants de la subdivision. Dans ce but, on dénote les intervalles  $I_g, I_b, I_{av}$  symbolisant les parties négatives des axes, par le symbole «-»; les intervalles  $I_d, I_{ha}, I_{av}$  symbolisant les parties positives des axes, par le symbole «+», les intervalles  $I_{g-d}, I_{b-ha}$  et  $I_{ar-av}$  symbolisant les parties négatives et positives des axes, par «-+».

À titre d'exemple, montrons la taxonomie pour la classe racine de l'arbre de spécialisation qui est représentée par les intervalles  $(I_{g-d}, I_{b-ha}, I_{ar-av})$ . D'après notre convention, celle-ci est notée par  $(-+, -+, -+)$  ou  $(\phi \phi \phi)$ . L'extension de la classe racine contient les 8 octants indexés soit par  $(---), (+--), (-+-), (++-), (--+), (+-+), (-++), (+++)$ , soit par le codage correspondant binaire-octal (base 2-base 8) des nombres entiers de 0 à 7(000), (100), (010), (110), (001), (101), (011), (111).

La classe racine spécialise six classes, et respectivement six orientations pour ses octants fils par rapport au repère, notés par  $(0 \phi \phi \text{ gauche}), (1 \phi \phi \text{ droite}), (\phi 0 \phi \text{ bas}), (\phi 1 \phi \text{ haut}), (\phi \phi 0 \text{ avant}), (\phi \phi 1 \text{ arrière})$ .

Chacune de ces six classes, marquées par des cercles gris, regroupe les octants avec deux degrés de liberté, c'est-à-dire deux changements possibles de coordonnées sur les axes du repère. Par exemple la classe  $(0 \phi \phi \text{ gauche})$  contient tous les octants avec deux degrés de liberté sur les axes différents de gauche, c'est-à-dire les octants 0,2,4,6. De la même façon les classes plus spécialisées, marquées par des cercles gris foncés, regroupent les octants avec un degré de liberté égal à 1, ou un changement possible des coordonnées. Chaque octant est complètement identifié à un niveau de la subdivision et peut être numéroté avec des nombres entiers en base binaire-octal dans l'ordre établi par notre convention. Le chemin parcouru de la racine jusqu'à l'octant courant détermine intrinsèquement l'identificateur (adresse) du volume à occuper et représente le nom de la classe. Les contraintes géométriques spatiales des octants sont définies par propagation des valeurs de la taille et l'orientation de la racine de l'octree.

La description d'une relation spatiale cible *est-à-droite-de* référence, produira un positionnement éventuel dans un volume englobant l'espace limité par la face droite de la référence et par la face gauche de la scène englobante initiale. Ce volume est représenté par la classe indexée qualitativement par la chaîne de caractères (1  $\phi \phi$ ), 1 pour la distance le long de X relative à droite,  $\phi$  (0 ou 1) pour la distance le long de Y, et  $\phi$  (0 ou 1) pour la distance le long de Z. En d'autres termes nous avons dénotés les instances de tous les octants situés à droite de la référence, ayant comme coordonnées sur l'axe X des valeurs positives et sur les axes Y et Z des valeurs nulles. Cette classe contient les quatre octants 1, 3, 5, 7 et spécialise le volume initial

5.5.3 Satisfaction des contraintes et test de consistance de la description spatiale

À cette phase, nous nous intéressons à la fois de la mise en œuvre d'une recherche de la place de positionnement de la cible conforme aux relations des contraintes et d'un test de la cohérence de ces contraintes 3D. Le test s'appuie sur la composition et sur la propagation des contraintes ID. La composition des contraintes ID implique aussi le phénomène de propagation de contraintes. Étant données un ensemble d'objets et les contraintes ID qui les lient, on peut, à l'aide de la composition, déduire des contraintes ID non formulées explicitement, ou affiner celles déjà formulées. On applique pour cela l'algorithme de propagation de contraintes ID qui par la même occasion va permettre de déterminer la consistance des contraintes.

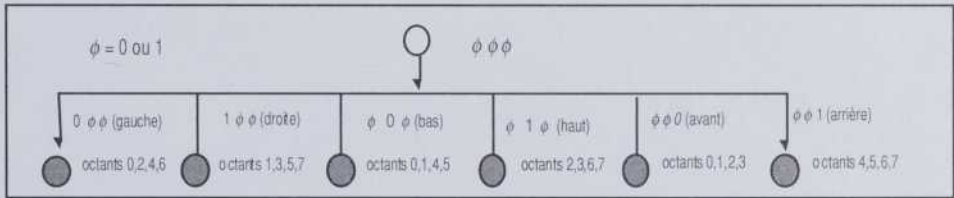


Figure 8. Taxonomie de six types d'orientation spatiale par rapport à un objet de référence du niveau NI=1

Le principe de l'algorithme de propagation est de propager toute nouvelle contrainte d'un couple d'objets vers (ou sur) toutes les autres contraintes des autres couples, sachant que la propagation de cette nouvelle contrainte peut elle même produire des nouvelles contraintes (on parle de nouvelle contrainte pour un couple donné lorsque la contrainte de ce couple a changée). L'algorithme s'arrête donc quand la dernière nouvelle contrainte a été propagée et qu'elle n'a pas crée de nouvelles contraintes (Figure 9). Si on traite par exemple un couple (i, j) de l'algorithme de propagation, alors, par composition des contraintes de (i, j) et (j, k) on déduit les relations possibles pour le couple (i, k). On

fait ensuite l'intersection de ces relations avec les contraintes déjà existantes pour  $(i, k)$  pour affecter le résultat en tant que contraintes pour  $(i, k)$ . C'est ainsi que la contrainte pour  $(i, k)$  peut avoir changé et être une des nouvelles contraintes à propager.

Supposons  $Nb\_Obj$  nombre d'objets à placer. Notons  $N$  un tableau de  $Nb\_Obj \times Nb\_Obj$  de contraintes  $ID$ . Au démarrage  $N$  contient les hypothèses de départ. Si  $N(i, j)$  n'est pas une hypothèse de départ alors  $N(i, j) = DALL$ , où  $DALL$  représente la disjonction des treize relations d'Allen. Si  $N(i, j)$  est une hypothèse de départ, alors  $N(j, i)$  devra être l'inverse de  $N(i, j)$ , sans quoi le résultat de l'algorithme de propagation ne sera pas valide. Une contrainte  $3D$  ne sera vérifiée que si chacune de ses trois contraintes  $ID$  est vérifiée. On peut appliquer l'algorithme de propagation des contraintes  $ID$  pour vérifier la consistance des contraintes  $3D$ . La propagation est optimale lorsque l'on obtient les graphes minimaux.

**Procédure** *Propagation\_des\_contraintes* ( $N$ : matrice)

**Debut**

Créer une Liste  $Q$  de contraintes telle que

$Q \leftarrow [(i, j) \text{ Tant que } 1 \leq i, j \leq Nb\_Obj, i \neq j]$

**Répéter jusqu'à**  $Q$  soit vide

    Choisir et supprimer un couple  $(i, j)$  de la liste  $Q$

**Pour** chaque intervalle  $k$  de 1 à  $Nb\_Obj$ , **Tant que**  $k \neq i$  et  $k \neq j$  **Faire**

$N(k, j) := N(k, j) \cap \text{Contraintes}(N(k, i), N(i, j))$

    Si  $N(k, j) = \rightarrow$  **Alors** le graphe est inconsistant. **Arrêt.**

        Si  $N(k, j)$  a été modifiée **Alors** ajouter la contrainte  $N(k, j)$  à la liste  $Q$

$N(i, k) := N(i, k) \cap \text{Contraintes}(N(i, j), N(j, k))$

        Si  $N(i, k) = \rightarrow$  **Alors** le graphe est inconsistant. **Arrêt**

        Si  $N(i, k)$  a été modifiée **Alors** ajouter la contrainte  $N(i, k)$  à la liste  $Q$

**Fin Pour**

**Fin Répéter**

**Fin**

**Fonction** *Contraintes*( $R1, R2$  : contraintes de  $N$ )

*Vider*  $R$

**Pour** chaque  $(r1 \in R1)$  et  $(r2 \in R2)$  **Faire**

$R := R \cup L[r1, r2]$  (où  $L(r1, r2)$  /\*représente l'entrée  $(i, j)$  dans la table de la Loi de composition des primitives de la logique d'Allen\*/

**Fin Pour**

**Return**  $R$

Figure 9. Algorithme de propagation (test de consistance de chemin) des contraintes  $ID$  d'Allen

Lors d'une reconnaissance des relations locatives deux cas sont possibles : la description peut être incomplète ou invalide. Dans le premier cas, il s'agit d'inférer une relation non explicite à la base de deux autres connues au sein d'un cadre de référence, en explorant la propriété de composition des relations spatiales. Dans le deuxième cas, il s'agit de faire un test de cohérence de la description spatiale, où un résultat de composition *nulle* est le signe d'une inconsistance. Cela indique que pour deux objets dans la description il manquent des relations qui peuvent les relier dans un chemin. Or pour qu'une description qualitative de scène soit réalisable il est nécessaire qu'il y ait au moins une relation d'Allen vérifiable par couple d'objet. Afin de résoudre le problème des distances nécessaires mais manquantes dans la description initiale des contraintes, la solution consistante qualitative en termes d'intervalles sur les trois axes se traduit sous forme de relations d'extrémités. Les graphes des relations sur les extrémités permettent d'évaluer les distances entre les extrémités des intervalles des boîtes englobantes et de les convertir dans un système d'inéquations linéaires. La résolution de ces systèmes donne des solutions exactes numériques sur le positionnement et la taille des objets.

#### 5.5.5 Résolution numérique

Si aucune incohérence n'a été détectée à la phase précédente, l'ensemble de toutes les contraintes locatives et géométriques va être regroupé en systèmes d'équations. La résolution de ce système nous fournira une solution particulière concernant les coordonnées des points caractéristiques de la boîte englobante de l'objet cible. Dans ce but les techniques CSP de type *back jumping* sont utilisées. Cette phase repose sur la paramétrisation algébrique des objets. Les relations locatives sont représentées par une expression rationnelle de  $n$  variables de type  $p_j = f(p_{i_1}, \dots, p_{i_m})$ , où  $p_j$  est un paramètre de l'objet cible  $j$  et les  $p_i$  sont des paramètres des objets de référence.

La résolution numérique se fait de manière incrémentale c'est-à-dire objet par objet dans l'ordre défini des scénarii spatiaux. Elle consiste dans le calcul local des contraintes locatives correspondant au vocabulaire spatial lors du processus du positionnement et la propagation des modifications à effectuer. L'avantage d'une telle approche est la réduction de la complexité d'inférence logique et aussi numérique. Nous proposons une bibliothèque de différents contraintes nommées : concentrique(cible, référence); adroite(cible, référence), parallèle(cible, référence), a-gauche(cible, référence); dessus(cible, référence) et dessous(cible, référence), devant(cible, référence) et derrière(cible, référence), etc. La structure modulaire de la bibliothèque facilite l'utilisation des contraintes existantes et aussi le rajout de nouvelles contraintes. Par exemple, pour les cas des contraintes qui peuvent être résolues par l'application de l'opération de transformation géométrique translation, la résolution se résume en calcul du nouveau vecteur-argument de cette opération  $\Delta$ -objet-xyz-t pour l'objet *cible* que nous notons :

$\Delta$ -objet-xyz-t =  $\langle \Delta$ -objet-x-t,  $\Delta$ -objet-y-t,  $\Delta$ -objet-z-t  $\rangle$ , où

$\Delta\text{-cible-xyz-t} = \Delta\text{-reference-xyz-t} + \Delta\text{-cible-xyz-t}$ .

Les valeurs des coordonnées de positionnement de la cible se donnent par

$XYZ_{\text{cible-t}} = XYZ_{\text{reference-t}} + \text{translation}(\Delta\text{-cible-xyz-t})$

Toutes les contraintes sont réalisables en deux variantes : avec la description de distances exactes entre l'objet cible et l'objet de référence ou avec le chevauchement en pourcentage donné entre ces deux objets. L'utilisation se révèle assez souple et permet au concepteur de se décharger du calcul fastidieux du placement.

### 5.5.6 Classification de la cible

Une fois que la boîte englobante de l'objet Cible positionnée est validée, ses données seront attachées à la classe correspondant dans la taxonomie d'orientation, c'est-à-dire à l'octant du cadre de référence qui l'englobe. Ces données seront utilisées dans le cas où un autre objet veut se référer à l'objet courant positionné. Donc tous les objets positionnés peuvent devenir des objets de références.

## 6. Implémentation et conclusion

Nous avons présenté un modèle hybride qui permet le développement des techniques de positionnement par intégration de mécanismes de raisonnement spatio-temporel et la subdivision de l'espace par la méthode *octree*. Deux aspects importants caractérisent notre approche de raisonnement: une classification par arbre de spécialisation des cadres de référence-octants de la subdivision dichotomique de l'espace et la résolution de CSP par test de consistance des expressions spatiales d'intervalle et le calcul incrémental des paramètres. L'application développée met en œuvre ce modèle de positionnement sous forme d'instructions du langage d'aide à la conception déclarative de scènes *SOML-Scene Objects Modeling Language* (Popov&al,98).

Nous avons montré, à la figure 6, un exemple de la configuration spatiale des objets composants de la scène *Pion* avec son scénario spatial en langage naturel simplifié. À la Figure 10 nous présentons l'exemple du positionnement d'une configuration de trois objets : Roue1-Axe1-Roue2 et la classification de ses composants. Les avantages de l'approche sont: hybridité de la représentation des données spatiales des composants de scènes, possibilité de raisonner sur ces données avec une vérification de la consistance de la description et déduction d'informations non explicites, possibilité de positionnement incrémentale en simplifiant le calcul des paramètres et de génération de plusieurs solutions satisfaisant les contraintes. Les limites de l'approche proviennent essentiellement du fait des approximations inhérentes aux techniques de subdivision de l'espace 3D.

Pour conclure, notons que très peu de travaux dans le domaine de la conception représentent le raisonnement spatial 3D comme raisonnement qualitatif, et encore moins en modélisation 3D. Les solutions proposées traditionnellement sont du style des modèles *hybrides* utilisant la coexistence des informations quantitatives et qualitatives (Mittal,95;Donikian,95). Jusqu'à maintenant, toutes les approches de raisonnement qualitatif consistent à utiliser des graphes dont les sommets sont étiquetés par des intervalles et les arcs par les relations possibles entre les intervalles, étiquetant leurs extrémités. La consistance globale de tels graphes n'est pas satisfaisante.

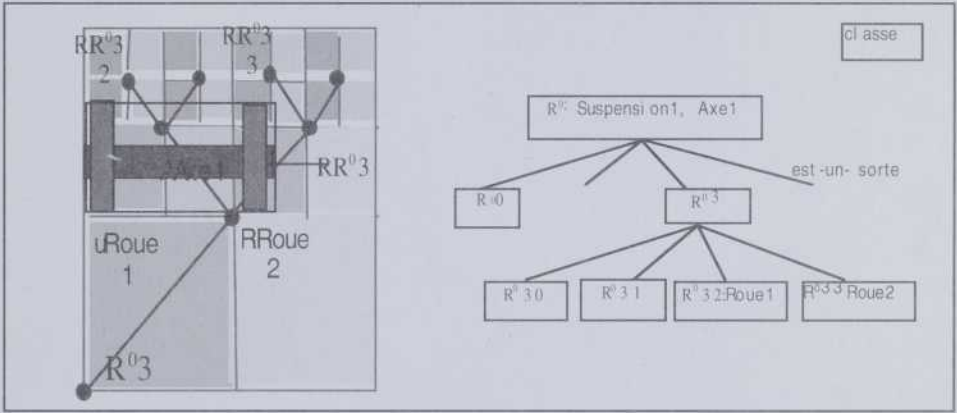


Figure 10. Positionnement de la configuration Roue1-Axe1-Roue2 et classification spatiale de composants

Nous envisageons de travailler dans deux directions : l'amélioration du modèle hybride, en particulier le langage de description et la représentation des relations spatiales ainsi que leur manipulation au sein d'une conception déclarative, d'autre part l'implémentation de l'approche de description des intervalles spatiaux sous forme de mots temporels, une méthode étudiée et réalisée dans (Schwer,97). Elle consiste à associer à chaque contrainte temporelle un langage rationnel sous forme spécialisée. Cette approche permet de maintenir globalement toutes les contraintes et rien que les contraintes à l'aide d'opérateurs usuels de l'algèbre des langages formels. L'ensemble des scénarios possibles est un langage régulier. Ce langage est vide si et seulement si le problème est inconsistant. Cette approche produit une discrétisation de l'espace qui est une miniaturisation conforme de la scène à échelle variable.

## Bibliographie

- Allen,83 J. F. Allen, Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. *Communications of the ACM*, vol. 26, n° 11, 832-843, 1983
- Aurnague, 96 M. Aurnague, L. Vieu, A. Birillo. - Représentation formelle des concepts spatiaux dans la langue
- Balbiani,99 P. Balbiani, A. Osmani. A model for reasoning about topologic relations between arcs. *Submitted to IJCA*
- Cambray,94 B. de Cambray, Etude de la modélisation, de la manipulation et de la représentation de l'information spatiale 3D dans les bases de données géographiques, 1994. *Thèse Paris 6*
- Chandrasekaran,97 B. Chandrasekaran, Spatial representation and reasoning, *AAAI Spring Symposium Series, Mar, 1997*
- Charman,95 Ph. Charman, Gestion des contraintes géométriques pour l'aide à l'aménagement spatial. *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 1995*
- Clementini,97 E. Clementini, P. Di Felice, D. Hernandez. Qualitative representation of positional information. *TR FKI -208 -95, July 95, New version February 97.*
- Dechter,91 R. Dechter, I. Meiri et J. Pearl. - Temporal constraint networks. *Artificial Intelligence*, vol. 49, n° 1-3, janvier 1991, pp. 61-95.
- De Paoli, 97 G. De Paoli. La CAO en architecture : modélisation des actions et définitions des opérateurs. *Cinquième table ronde francophone sur la conceptio, Théoule-sur-mer, 24-26 Septembre 1997.*
- Donikian,95 St. Donikian, G. Hégron., *Constraint Management in a Declarative Design Method for 3D Scene Sketch Modeling.*
- Foley,90 James D. Foley , Andries van Dam, Steven Feiner et John Hughes, Computer Graphics, Principles and Practice, *Addison-Wesley Systems Programming Series, 1990*
- Freksa, 91 C. Freksa. Qualitative spatial reasoning. In Cognitive and linguistic aspects of geograhic space édité par D. M. Mark et A. U. Frank, NATO Advanced Studies Institutue, Kluwer, Dordrecht, pp. 361-372.
- Haton,91 Jean-Paul Haton & al., Le raisonnement en intelligence artificielle, *Interéditions, Paris, 1991.*
- Hernandez95 D. Hernandez, A. Mukerjee. - Representation of Spatial Knowledge. Fourteenth Int. *Joint Conf. on AI (IJCAI 95), 1995, Montreal, Canada.*
- Kautz,91 H. A. Kautz et P. B. Ladkin - Integrating Metric and Qualitative Temporal Reasoning. *Proc. of the 9th National Conf. on AI, AAAI -91, pp. 241-246. - Anaheim, CA, 1991.*

- Jeansoulin, 97 Robert Jeansoulin, Contact, Share and Order: basic constraints in Geographic Information, *AAAI'97, RI, USA*
- Lucas,90 Lucas, D. Martn, P. Martin, D. Plemenos, Le projet Exploformes, *BIGRE 67, 1990*
- Mäntylä,88 Martti Mäntylä, An introduction to solid modeling, *Computer sciences press, 1988*
- Martini, 95 Kirk Martini, Hierarchical geometrical constraints for building design, *Computer Aided Design, N°3,1995*
- Meiri,91 Meiri Combining Qualitative and Quantitative Constraints in Temporal Reasoning. *Proc. of the 9th National Conference on Artificial Intelligence, AAAI-91, pp. 260- 267. - Anaheim, CA, 1991.*
- Mital,95 Nishant Mital, Amitabha Mukerjee . - Qualitative Subdivision Algebra : moving towards the qualitative. *UT Austin CS Dept TR 95-25/IIT Kanpur TR ME-95-011*
- Mukerjee,90 A. Mukerjee et G. Joe. A qualitative modèle for space. Dans les actes de 9<sup>th</sup> AAAI, P. 721-727, Boston, Massachusetts, 1990
- Mukerjee,96 Amitabha Mukerjee. - Neat vs Scruffy : A survey of Computational Models for Spatial Expressions. *UT Austin CS Dept TR 96 /IIT Kanpur TR ME-96*
- Nebel,93 B. Nebel and H.J. Bürckert. Reasoning about temporal relations: a maximal tractable subclass of Allen's interval algebra. *Technical report 11, DFKI, saarbrücken, Germany.*
- Nguyen,96 Cristian Nguye, Jean Claude Lafon, SIDEFO: a System for Interactive Design of Exact Parametrized Objects, *Springer Verlag, 96*
- Papadias,94 D. Papadias, Y. Theodoris : Spatial relations, minimum bounding rectangles, and spatial structures, Technical report KDBSLAB-TR-94-04, *University of California:*
- Peroche,88 Bernard Peroche, Jackeline Argence, Djamchid Ghazangarpour, Dominique Michelucci, La synthèse d'images, *Hermes, 1988*
- Plemenos,91 Plemenos., Contribution à l'étude et au développement des techniques de modélisation, génération et visualisation de scènes. Thèse de Doctorat d'Etat en Informatique, *Université de Nantes, 1991*
- Popov&al,98 V. Popov, L. Popova, G. De Paoli. Vers un langage déclaratif de conception de scènes. *ACADIA'98, Québec, Canada, 1998.*
- Quinrand,85 P. Quinrand, J. autran, M. Florenzano, M. Freigier, et J. Zoller. La Conception Assistée par Ordinateur en Architecture. *Traité des Nouvelles Technologies, série assistance par ordinateur, HERMES, 1985.*
- Randell,92 D.A. Randell, Z. Cui and A. G. Cohn. - A spatial logic based on regions and connection, *Proc. 3rd Int. Conf. on Know. Repr. and Reasoning, San Mateo, 165-176.*

- Schmeltzer, 95 Olivier Schmeltzer, Modélisation de cartes génomiques. Une formalisation et un algorithme de construction fondé sur le raisonnement temporel, *Thèse de doctorat de l'Université Grenoble 1, 1992*
- Schwer,97 S.R. Schwer, Dépendances temporelles, les mots pour le dire, *rapport interne LIPN, 97*
- van Beek,90a van Beek et R. Cohen. - Exact and approximate reasonig about temporal relations. *Computational Intelligence, vol. 6, 1990, pp. 132-144.*
- van Beek,90b van Beek. - Reasoning about Qualitative Temporal Information. *Proc. of the 8th National Conference on AI, AAAI-90, pp. 728-734. - Boston, MA, 1990.*
- Vilain,86 M. Vilain and H. Kautz. Constraint propogation algorithms for temporal resoning. *Proc. of the 5th Nat. Conf. on AI, AAAI-86, 377 - 382.*

## **Modélisation 3D avec *form•Z***

**Nouveau support à la conception architecturale en atelier de première année**

**Myriam Blais, Jacques White**

*École d'architecture, Université Laval, Québec*

**Résumé.** *Le design architectural est une activité de création qui mène à la transformation de l'environnement naturel ou bâti, permettant de créer quelque chose qui n'existait pas avant l'intervention d'un concepteur. Il procède selon un cycle répétitif d'imagination, de présentation et d'évaluation des idées. Le processus de design permet de générer de bonnes solutions en réponse à des défis particuliers, dans la mesure où le concepteur se donne les moyens de procéder par itérations successives. Dans la plupart des écoles d'architecture, les ateliers constituent le lieu privilégié de l'apprentissage du design. Dans ce milieu, l'enseignement vise principalement à développer, chez les étudiants, des habiletés pour la découverte, l'application, l'intégration et le partage des concepts et des connaissances en architecture. Les étudiants qui débutent leurs études en architecture font face, entre autres choses, à un double défi: acquérir rapidement une méthode de design – ce qui constitue une expérience nouvelle pour la majorité d'entre eux – et se familiariser avec les moyens usuels de représentation des objets et des lieux architecturaux. Puisque les possibilités d'itération pendant la conception dépendent de l'efficacité de la méthode et de la capacité à représenter des idées d'une manière éloquente, les étudiants ont avantage à acquérir ces outils de travail et de réflexion très tôt dans leurs études. Un projet pilote, mené à l'école d'architecture de l'Université Laval, démontre que l'intégration d'outils de modélisation informatique, dès la première année du baccalauréat, encourage les étudiants à aborder le design d'une manière plus itérative et contribue à développer leurs habiletés à représenter leurs idées avec éloquence.*



La boucle de design présentée ici montre que le mouvement en spirale, qui mène au domaine des réponses satisfaisantes à un problème de design, est effectivement accompagné de cycles consécutifs d'imagination-présentation-évaluation (*image-present-test*). Zeisel explique que le développement d'une image ou l'imagination (*imaging*) est une « solution en principe » qu'élabore le concepteur, suite à l'analyse et à l'interprétation de l'information de base particulière à un problème de design. La présentation (*presenting*) met en jeu les dessins et les maquettes nécessaires pour la communication, l'évaluation et le développement des premières images. Finalement, l'évaluation (*testing*) correspond au jugement réfléchi et critique que porte le concepteur sur son travail et qui, par un regard à la fois rétrospectif et prospectif, prépare la voie au prochain bond créatif (*creative leap*). Ce jugement permet de définir et de redéfinir davantage le problème de design et de raffiner les images qui suivront (Zeisel, 1981).

Les ateliers de design architectural constituent donc l'un des meilleurs systèmes d'apprentissage et de développement personnel jamais conçus, puisqu'ils offrent des possibilités inégalées de combiner créativité, idéalisme et réalisme (Boyer et Mitgang, 1996). Ainsi, les ateliers de première année sont particulièrement importants lorsqu'il s'agit d'inculquer de bonnes habitudes aux étudiants qui entreprennent leurs études en architecture, car ceux-ci font face à un double défi. Ils doivent, d'une part, être initiés aux méthodes de design en architecture, ce qui représente une expérience d'apprentissage nouvelle pour la très grande majorité d'entre eux et, d'autre part, se familiariser avec les moyens de représentation usuels en architecture, soit les croquis, les dessins et les maquettes. Comme l'élaboration et le bon usage de dessins et de maquettes complets et éloquents sont nécessaires au développement et à la présentation de leurs idées ou images de design, les étudiants doivent acquérir ces outils de travail et de réflexion très tôt dans leurs études et continuer à les raffiner constamment.

Nous avons fait le pari que l'intégration d'un outil de modélisation informatique (notamment *form•Z*<sup>1</sup>) dans les ateliers de design architectural, dès la première année du baccalauréat, pourrait, en plus de préparer très tôt les étudiants aux réalités de la pratique, contribuer à mettre en valeur la tradition de design et son potentiel pédagogique. Nous espérons que, grâce à ce nouvel outil, toutes les étapes du processus de design qu'illustre Zeisel en bénéficieraient, parce que la présentation des idées qui assure l'évaluation et le développement des images serait plus éloquente. Une expérience pilote a donc été menée à cet effet pour la première fois à l'hiver 1998 et fut reconduite cette année.

---

<sup>1</sup> *Form•Z* est un logiciel de modélisation 3D élaboré par la compagnie auto•des•sys inc. Nous avons opté pour ce logiciel parce que notre école avait une bonne expérience de son utilisation et de son potentiel dans les ateliers avancés de design et que son apprentissage était relativement facile.

## 2. Buts, innovations et méthodes de l'expérience pédagogique

Les trois objectifs principaux visés par l'intégration de la modélisation 3D dans les ateliers de design architectural en première année du baccalauréat étaient de: 1) développer plus rapidement les habiletés en design des étudiants; 2) les aider à produire des propositions de design plus complètes et 3) les encourager à acquérir très tôt durant leurs études une bonne compétence dans l'usage de l'ordinateur pour la conception et le dessin. Nous pensions qu'en ayant une meilleure visualisation ou présentation de leurs propres idées ou images de design, les étudiants en aurait aussi une meilleure compréhension, ce qui leur permettrait de tester ces idées plus tôt dans le processus normal de design et, conséquemment, de les améliorer.

L'expérience comprenait aussi trois aspects particulièrement novateurs: 1) elle s'inscrivait dans le cadre d'un atelier de design obligatoire en première année, intitulé *Habitation 1*, qui n'avait jusqu'à l'hiver 1998 jamais eu de lien avec la conception assistée par ordinateur et qui, selon le programme de notre école, doit rencontrer des objectifs pédagogiques qui sont spécifiquement reliés à la conception d'habitations de petite ou de moyenne envergure; 2) elle s'adressait à des étudiants qui en étaient à leur second trimestre de design architectural seulement et qui s'y étaient inscrits volontairement, la seule condition d'entrée étant de se procurer un ordinateur personnel et de l'installer à l'école pour toute la durée du trimestre<sup>2</sup>; et 3) en tant que responsables de ces ateliers dits informatisés, nous ne possédions pas, comme beaucoup d'architectes et de professeurs, de compétence particulière en modélisation 3D. Des auxiliaires d'enseignement (étudiants à la maîtrise en architecture) se sont chargés de cet aspect de l'expérience.

Étant donné l'importance des ateliers de design pour l'apprentissage de l'architecture et des nombreux concepts qui lui sont associés, et en tenant compte des buts visés par notre expérience, les méthodes pédagogiques et les exercices proposés aux étudiants devaient être facilement adaptables à cette nouvelle situation. En termes de méthodes pédagogiques, les étudiants furent constamment encouragés à apprendre à partir de ce qu'ils savaient déjà. Ils devaient reconnaître les bons et moins bons côtés des choses qu'ils tenaient pour acquises, y réfléchir d'une nouvelle façon à la lumière de lectures parfois inusitées et d'analyse de précédents, pour finalement découvrir par eux-mêmes les nouvelles connaissances visées par l'atelier. Une telle façon de procéder leur a donné confiance dans la valeur et la pertinence de leur propre savoir, ainsi que dans leur capacité

---

<sup>2</sup> Quinze étudiants se sont portés volontaires en 1998, trente en 1999. En 1998, la moitié d'entre eux avait déjà une expérience préalable en dessin assisté par ordinateur, notamment avec *Autocad*; alors qu'en 1999, il s'agissait du quart des étudiants seulement. Les autres étaient peu familiers avec l'ordinateur au début du trimestre.

à apprendre par eux-mêmes. Devant l'inconnu que pouvait représenter la modélisation informatique au départ, ils ont été davantage rassurés. À ce propos, les étudiants furent informés qu'ils bénéficieraient de toutes les opportunités d'apprendre *form•Z* avec l'aide des deux auxiliaires d'enseignement, et qu'ils demeuraient tout à fait libres de faire l'usage qu'ils souhaitaient de ce nouvel outil de conception.

Les exercices de l'atelier, pour leur part, furent conçus et menés de façon à ne pas isoler l'apprentissage du design d'habitations de celui de l'outil informatique. En s'attaquant à ces deux aspects simultanément, nous pensions que le cycle de design imagination-présentation-évaluation serait accru puisque chacun mettrait l'autre en valeur.

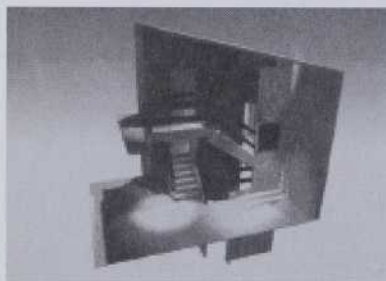
### 3. Les exercices pédagogiques de l'atelier et la modélisation informatique

Selon le programme de notre école, l'atelier de design *Habitation 1* vise à développer, par des activités pratiques, la compréhension, la synthèse, l'évaluation et l'expression des idées sous-tendant l'élaboration de petits projets d'habitation. L'accent est mis sur la compréhension de ce que la maison représente, sur la conception de logis, de même que sur la définition spatiale, l'occupation et l'appropriation des lieux. La particularité des deux ateliers informatisés résidait évidemment dans l'intégration graduelle d'un nouvel outil de conception et de dessin aux exercices du cours. Dès le départ, les étudiants furent informés que l'ajout de cet outil de modélisation au programme normal de l'atelier visait à améliorer leur prise de décision en design, et que le développement de leurs idées ainsi que la réflexion critique qui l'accompagne étaient plus importants que les exploits de modélisation 3D. La conception d'habitations, à cause de leurs espaces nombreux, petits et différents, constitue un terrain d'expérimentation très fertile pour l'usage d'un logiciel comme *form•Z*, spécialement en termes d'ambiance et de perceptions sensorielles.

Le trimestre de quatorze semaines a été divisé en deux parties distinctes, associées à des objectifs pédagogiques particuliers. La première partie, composée de deux exercices d'introduction (deux semaines chacun), avait pour but d'initier les étudiants à la fois à « l'esprit » de l'atelier et à la modélisation 3D à l'aide de *form•Z*. La deuxième partie fut consacrée à deux exercices de design architectural : une maison hantée pour Gaston Bachelard (quatre semaines) et un petit ensemble de logements urbains au centre-ville de Québec (six semaines). Puisque les exercices étaient interreliés, les étudiants ont pu et ont su tirer profit des connaissances développées et accumulées de l'un à l'autre. Voici un aperçu de l'itinéraire d'un des deux groupes d'étudiants.

### 3.1 Exercices d'introduction: Escaliers et Seuils

Bien que ces exercices d'introduction constituaient un premier prétexte pour l'apprentissage de la modélisation informatique, ils furent d'abord conçus pour la compréhension et l'illustration de notions ou de concepts abstraits qui qualifient certains espaces de la maison. Pour le premier exercice, intitulé *Escaliers*, les étudiants devaient, après une lecture de Bachelard (1983), de Pérec (1974) et de Tournier (1986) portant sur les aspects mystérieux et poétiques de l'escalier, produire des croquis illustrant leur interprétation des idées véhiculées dans ces textes. Ensuite, ils devaient construire un de leurs croquis à l'aide de *form•Z*. Si la conception et le dessin d'un escalier se sont avérés relativement simples en termes de modélisation informatique, les considérations des étudiants pour le plaisir, le confort et les surprises y ont été traduites de façon assez éloquente. C'est d'ailleurs cette traduction du texte au dessin final qui a été évaluée, en tenant toutefois compte de l'effort investi dans l'apprentissage de l'outil informatique.



a)



b)

Figure 2. Escaliers. Travaux de J-F. Renaud a) et C. Genest b)

Le deuxième exercice d'introduction consistait en une analyse et une comparaison critiques de maisons conçues par des architectes, spécialement en ce qui concerne leurs seuils, ou l'espace intermédiaire entre le privé et le public ou l'intérieur et l'extérieur. Comme pour l'exercice précédent, une lecture de Gaudin (1992), de Hertzberger (1991) et de von Meiss (1993) a permis de bien cerner les éléments architecturaux et les caractéristiques d'un seuil, et les moyens appropriés à la matérialisation d'une telle idée. Les étudiants ont eu à choisir, pour chaque maison étudiée, des seuils intéressants qu'ils ont ensuite reconstruits par modélisation informatique.

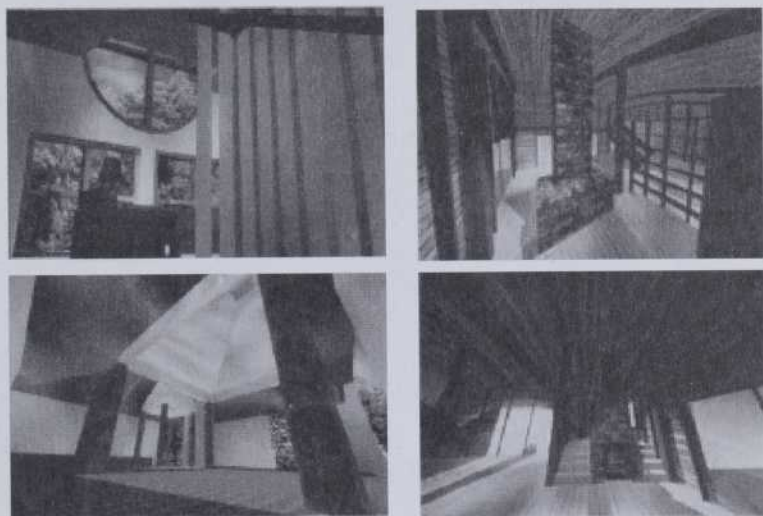


Figure 3. Seuils

- a) Maison Tucker (Robert Venturi) par Fredette, Milot, Roy et Simard.  
 b) Maison Moore (Charles Moore) par Blackburn, Chênevert, Richard et Vaillant.  
 c) Yaukey cottage (Bryan MacKay-Lyons) par Deblois, Faguy, Renaud et Tremblay

### 3.2 Projets de design: maison hantée et logements urbains

Le premier projet de design, une «maison hantée» pour Gaston Bachelard, l'auteur de *La poétique de l'espace*, visait principalement l'intégration des connaissances acquises au cours des deux exercices précédents, tant en termes de conception de logis que de modélisation informatique. Le scénario de cet exercice a d'ailleurs encouragé l'usage de l'outil de modélisation pour le développement du projet. En effet, son destinataire était déjà bien connu des étudiants, qui étaient aussi familiers avec ses souhaits d'espaces pour la rêverie et les surprises. Pour la conception et la mise en valeur de ces espaces hantés, les étudiants ont su tirer un fort potentiel de *form•Z*. Ainsi, il fut possible d'apprécier, de modifier et d'améliorer leur projet, au gré des promenades faites tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de leurs maquettes virtuelles. Ces promenades ont d'ailleurs permis aux étudiants de mesurer toute la pertinence du cycle de design imagination-présentation-évaluation.

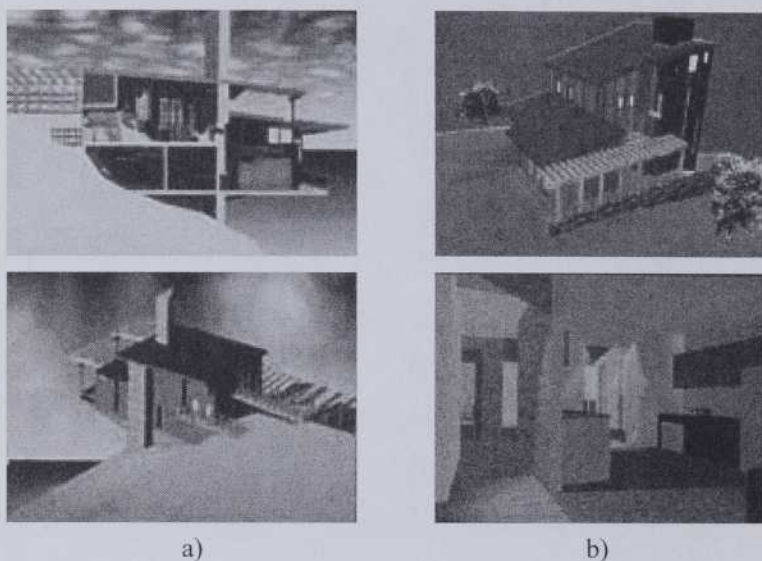


Figure 4. Maison hantée pour Gaston Bachelard

a) Projet de J.F. Renaud et de J.N. Faguy et b) Projet de Y. Lacasse et de M.A. Fredette

Pour le dernier exercice du trimestre, la conception d'un petit ensemble de logements urbains à Québec, les étudiants ont débuté par une analyse du site et une étude de précédents. Leurs premières propositions typologiques et volumétriques devaient tenir compte des caractéristiques de l'environnement immédiat et de l'ensoleillement dont le site et le projet bénéficieraient. *Form•Z* fut particulièrement utile à ce stage préliminaire du développement d'un projet puisqu'il a permis de mesurer, très tôt dans le processus de conception et avec précision, la valeur et les impacts des toutes premières idées de design.



Figure 5. Logements urbains – implantation et vues extérieures  
Projet de J.F. Renaud et de J.N. Faguy

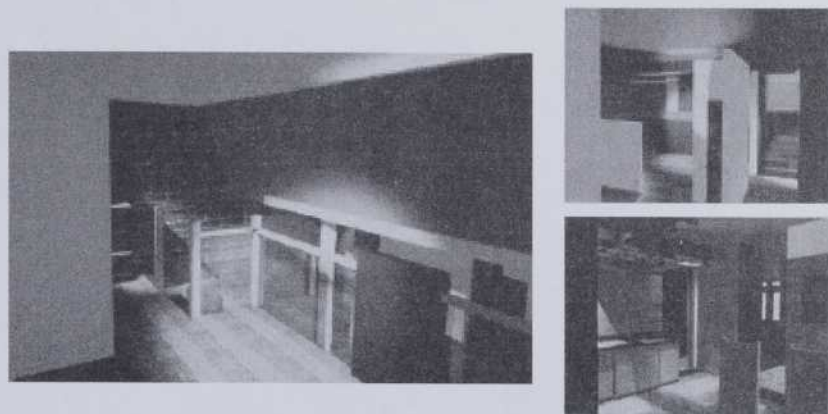


Figure 6. Logements urbains – vues intérieures  
Projet de J.F. Renaud et de J.N. Faguy

Bien que cette première étape se soit avérée encourageante et rassurante, l'ampleur de ce projet ou le court laps de temps qui lui fut alloué a fait en sorte qu'il ne fut pas

approché comme le précédent. Certains étudiants ont affirmé que leur brève expérience en modélisation 3D leur permettait déjà d'anticiper et de visualiser plus facilement la troisième dimension de leur travail: ils ont donc beaucoup plus esquissé à la main les plans des logements projetés. En conséquence, les aspects fonctionnels de ces logements ont été avantagés au détriment des aspects expérimentiels du logis, l'anticipation de la troisième dimension n'étant vraisemblablement pas aussi efficace que la modélisation 3D pour nourrir le processus de design. Autrement dit, l'étape présentation du cycle de design imagination-présentation-évaluation n'étant pas aussi explicite par une image en plan que par un modèle tridimensionnel interactif, l'évaluation des qualités spatiales d'un lieu ne peut se fonder sur les mêmes critères ni aboutir aux mêmes conclusions.

En contrepartie, la composition des façades urbaines a été fortement développée et raffinée avec l'outil de modélisation. Plusieurs perspectives ont permis d'offrir un point de vue très réaliste des projets et ainsi de mieux en apprécier les qualités spatiales et matérielles. L'ensemble des travaux des étudiants a été présenté de façon complète et variée, comme en font foi les dessins et maquettes virtuelles produits pour l'occasion, ce qui a grandement facilité la communication et le partage des idées.

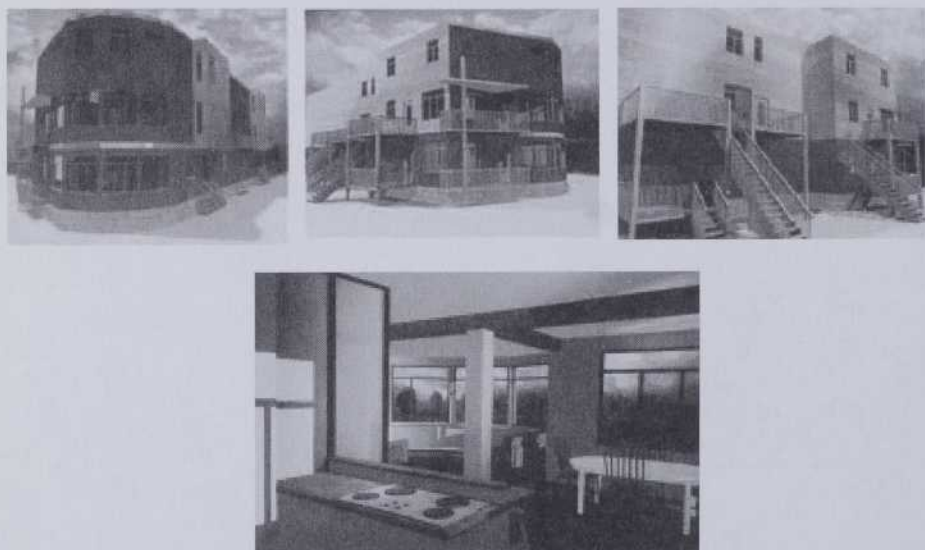


Figure 7. Logements urbains

a) et b) Projet de C. Genest et M.A. Fredette

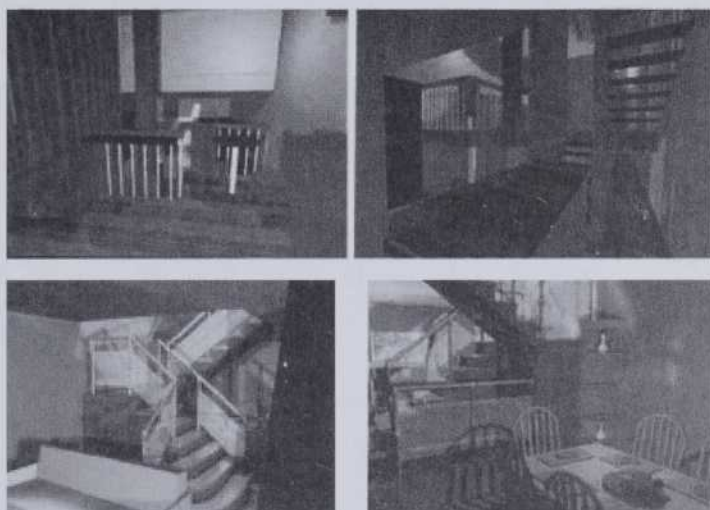


Figure 8. Logements urbains – vues intérieures  
 Projet de N. Roy;  
 Projet de É. Deblois et M.É. Tremblay

#### 4. Leçons à tirer de l'expérience

Considérant la quantité de concepts nouveaux que les étudiants qui débutent leurs études en architecture doivent acquérir en atelier de design, tant en termes de méthodes de conception que de moyens de représentation, l'intégration d'un outil informatique pour la conception architecturale (et aussi pour le dessin) représente un défi additionnel important. Cependant, ce projet pilote, qui en est maintenant à sa deuxième édition et qui a intéressé deux fois plus d'étudiants volontaires cette année que l'an dernier, montre que l'expérience est possible et profitable à plusieurs points de vue.

Si les méthodes pédagogiques furent semblables au cours de ces deux années, les exercices ont quelque peu changé. Contrairement à l'an dernier, où certains exercices s'étaient avérés moins pertinents parce qu'ils avaient entraîné une trop forte consommation de temps de modélisation, les exercices de cette année intégraient la modélisation informatique avec *form•Z*, à titre d'outil de présentation et d'évaluation faisant partie prenante du cycle de design présenté aux étudiants débutants. Les résultats démontrent que les ateliers du deuxième trimestre de la première année sont un lieu

adéquat pour une telle intégration. Bien que l'impact réel de l'expérience sur les habilités en design des étudiants et sur la qualité de leurs travaux soit difficile à mesurer précisément, des conclusions positives, entérinées par les étudiants eux-mêmes, peuvent toutefois en être tirées:

1) après les deux ou trois premières semaines de travail en atelier, les étudiants avaient déjà une très bonne maîtrise de la mécanique *form•Z*;

2) ils sont convaincus de la pertinence et de l'intérêt d'utiliser un outil de modélisation 3D en atelier de design dès la première année de leur baccalauréat. Ils sont toutefois conscients qu'il y a un certain équilibre à trouver entre l'usage qu'ils font de l'outil pour la conception et pour le dessin de présentation et aussi entre l'outil informatique et le dessin à la main. Ces deux choses, pensent-ils, viendront avec l'expérience;

3) ils ont beaucoup apprécié l'ambiance des ateliers où régnaient un fort climat d'entraide et un bon esprit d'équipe entre tous les étudiants;

4) ils ont trouvé l'expérience stimulante, gratifiante et rassurante au niveau personnel (ils sont conscients d'avoir relevé tout un défi et accompli une somme de travail impressionnante);

5) ils croient que leurs projets ont pu évoluer plus rapidement grâce à la modélisation 3D. L'effet « maquette virtuelle », dans laquelle ils peuvent se promener, permet de confirmer leurs idées, d'apporter des modifications plus facilement et aussi d'entretenir des discussions plus fructueuses avec leur professeur parce que toutes les ambiguïtés inhérentes à des dessins peu précis sont levées. D'ailleurs le professeur peut leur suggérer plus facilement de vérifier certaines choses en particulier parce que le modèle 3D permet souvent de le faire très rapidement;

6) finalement, ils apprécient que l'outil informatique leur donne un accès direct et précis aux espaces intérieurs de leurs projets, ce qui les encourage à travailler ces espaces davantage.

Dans l'ensemble, les étudiants sont heureux que l'école leur ait donné l'opportunité de s'inscrire à un tel atelier « informatisé » dès leur première année de baccalauréat. Ils sont, à juste titre, très fiers du boulot qu'ils ont accompli, et les travaux présentés ici sont la meilleure preuve de leur succès.

## Références

- Bachelard, G.: 1983, *La poétique de l'espace*. Presses Universitaires de France, Paris.
- Boyer E. and Mitgang L.: 1996 *Building community. A new future for architecture education and practice*. The Carnegie Foundation for the advancement of teaching, Princeton.
- Gaudin, H.: 1992 *Seuils et d'ailleurs*. Éditions du Demi-cercle, Paris.
- Hertzberger, H.: 1991 *Lessons for students in architecture*. Uitgeverij 010, Rotterdam.
- Pérec, G.: 1974 *Espèces d'espaces*. Galilée, Paris.
- Rowe, P.: 1992 *Design Thinking*. MIT Press, Cambridge.
- Tournier, M.: 1986 *Petites proses*. Gallimard, Paris.
- von Meiss, P.: 1986 *De la forme au lieu. Une introduction à l'étude de l'architecture*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Zeisel, J.: 1981 *Inquiry by design. Tools for environment-behaviour research*. Cambridge University Press, Cambridge.

## Note

En 1999, deux groupes d'étudiants ont participé à ces ateliers. Un premier groupe, dont certains travaux sont illustrés ici, était formé de Dany Blackburn, Corinne Champlain, Annie Chênevert, Élisabeth Deblois, Jean-Nicolas Faguy, Marc-Antoine Fredette, Cynthia Genest, Yasmina Lacasse, Caroline Leclerc, Mathieu Milot, Jean-François Renaud, Martin Richard, Nicolas Roy, Mathieu Simard, Marie-Ève Tremblay et Julie Vaillant. Un deuxième groupe était composé de Sophie Chapados, Mélanie Coderre, Barbara Di Vito, Alexandre Frenière, Frédéric Girard, Yan Laplante, Marianne Larose, James Leeming, Catherine Maheux, Geneviève Marquis, Gabriel Rivest, Isabelle Roberge-Morissette, Karen Smith et Myriam Sylvain. Les auxiliaires d'enseignement étaient Romain Chauvelot et Mathieu Paradis. Nous les remercions très sincèrement pour leur enthousiasme, surtout à la lumière de l'impressionnante quantité de temps et de travail qu'ils ont investie dans ce projet.



## **Des outils intelligents en architecture et de la technologie Kansei**

**Geneviève Bosvieux Coilliot**

*Laboratoire d'Artois Mécanique et Habitat Université d'ARTOIS, rue de l'Université  
62408 BÉTHUNE*

*E-mail : bosvieux@univ-artois.fr*

**Résumé.** *Dans ce papier nous nous intéressons aux outils « intelligents » qui peuvent aider la conception en architecture, à travers la communication homme - machine - homme.*

*Nous étudions en particulier les interfaces qui permettent une utilisation aisée et familière et mettent en valeur le savoir-faire des concepteurs.*

*Cela va dans le sens des courants actuels qui favorisent l'émergence de nouveaux concepts basés sur l'utilisation des sens et du jugement des « hommes de l'art » dans la réalisation de process plus affinés. C'est un des objectifs des technologies Kansei, à la base de techniques permettant de développer de nouvelles interfaces.*

### **1. Introduction**

Des interfaces homme-machine se développent tous les jours, en particulier dans les domaines qui touchent à la conception; l'architecture fait ainsi l'objet de nombreux développements en travail coopératif.

Dans ce papier, nous présentons successivement la position du problème, puis notre proposition : la personnalisation. Lors de précédents travaux nous avons développé « Device », un générateur gestuel, qui permet de prendre en compte le besoin de

personnalisation. Nous rapprochons cette proposition de la démarche de la technologie kansei. Nous proposons un hyper-environnement pour aider les activités de conception.

## 2. Position du problème

Dans le cadre de nos recherches, nous nous intéressons aux *outils intelligents*, qui permettent d'aider la conception en architecture, à travers la communication homme - machine - homme.

Nous ajoutons ce deuxième retour à l'homme, pour marquer le rôle intermédiaire de la machine, dans le dialogue actif de l'homme avec lui-même, comme cela se présente lors des activités de conception. Donald Schön parle de « réflexion dans l'action » [1].

Nous étudions en particulier les interfaces :

- qui permettent une utilisation aisée et familière,
- qui permettent de mettre en valeur le savoir-faire des concepteurs.

Ces deux points nous semblent fondamentaux ; chacun aime travailler à sa façon, utiliser ses secrets... pourquoi ce type de comportement ne se retrouverait-il pas quand on utilise des ordinateurs ? Les progrès de la mécatronique et de l'informatique commencent à rendre cela possible.

En architecture, si l'on considère le premier point, les « carnets de croquis » en sont un exemple, et ont toujours une grande importance. Diverses études font des propositions d'informatisation de ces carnets d'esquisses [2].

Pour le deuxième point, nous pensons que la mise en valeur des savoir-faire passe par la création et l'utilisation d'outils « intelligents ». Nous interprétons d'ailleurs ce mot « intelligent » selon les définitions de R. GREGORY [3] ; il distingue l'intelligence de la connaissance emmagasinée, et l'intelligence en action dans la résolution de problèmes. Il les nomme « intelligence potentielle » et « intelligence cinétique », qui reflètent la connaissance et l'initiative. Ainsi l'intelligence potentielle n'est pas seulement dans l'esprit et les cerveaux mais aussi dans les outils, qui contiennent une réponse à la résolution de problèmes. Il donne un exemple : comment couper un vêtement ? Ce problème peut être résolu avec une paire de ciseaux ; celle-ci a été développée par des générations successives qui ont résolu pas à pas le problème - intelligence cinétique - pour produire une intelligence potentielle, présente dans le design actuel.

### 3. Proposition : la personnalisation

Pour répondre à ces objectifs, notre proposition est de créer des outils qui permettent d'exprimer le besoin de personnalisation.

Nous considérons la personnalisation comme une nécessité :

- pour créer et tester de nouveaux processus, de nouveaux instruments,
- pour conduire ces processus
- pour créer des objets et leur ajouter des caractéristiques statiques ou dynamiques,
- pour visualiser et agir sur les objets,
- pour réutiliser des objets et les adapter à de nouveaux environnements...
- pour naviguer dans les bases de données, dans des espaces virtuels,
- pour les outils d'évaluation et d'aide à la décision ; aussi bien dans la présentation (graphique, schéma, commentaire...), que dans le choix de modèles...

Entre les croquis et les outils de CAO traditionnels, il y a place pour des environnements informatisés permettant de donner un dessin, une interprétation « renseignée », à des demandes faciles à mettre en forme, de façon quasi graphique, dans les actes de conception.

Ainsi le concepteur peut donner un sens aux « traits » qui représentent un plan. Donnons un exemple simple : un trait rouge, ou un trait large veut dire 'mur porteur', et donc permet de lancer des calculs techniques, financiers...[4]

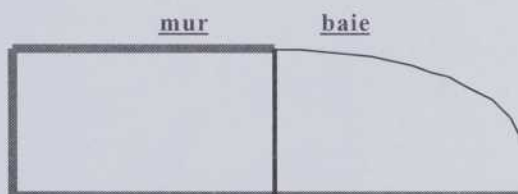


Figure 1. Le trait par sa consistance désigne un qualificatif, ici « mur porteur », qui peut être quantifié, qualifié, et permettre d'associer des calculs, lancés par un lien hypertexte.

### 4. « DEVICE »

Lors de précédents travaux menés entre l'université d'ARTOIS (France) et l'université de SHEFFIELD (Grande Bretagne) avec Peter SZALAPAJ, nous avons proposé **DEVICE** ( a user-Definable Environment with Visual Interaction and Creative Expression) un générateur gestuel, **constructeur de menu personnalisable** [5 ; 6] qui permet de décrire des objets graphiques et non-graphiques avec lesquels la personne souhaite travailler.

Il permet à l'utilisateur de :

- définir ses **propres fonctions**
- de façon quasi gestuelle, sans programmation
- à partir d'une **saisie multiparamétrée, mettant en valeur le geste,**
- en précisant des **liens** d'interprétation.

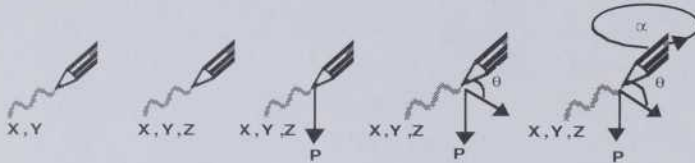


Figure 2. Exemple de saisie : **X, Y, Z** - coordonnées; **P** - pression;  $\theta$  - inclinaison;  $\alpha$  - lacet, torsion. Un lien est construit entre les données gestuelles et leur interprétation....

Ce constructeur, en partie définissable par l'utilisateur, doit permettre à celui-ci de construire ses outils, le contexte et les modes d'interaction entre les outils et le contexte, pour mettre en valeur ses aptitudes. Nous avons étudié différents cas, en peinture et en calligraphie, dans la conduite de procédures en ligne en robotique, en nouvelles techniques d'enseignements (NTE), et en conception architecturale [5,7,8].

## 5. Les interfaces de saisie

Douglas Englebart a inventé la souris en 1964 pour pointer du texte. Ivan Sutherland a perfectionné le concept de crayon optique pour dessiner directement sur l'écran. Par manque de précision et fatigue de la main levée sur l'écran, qui s'ankylose... on trouve maintenant très peu de crayons optiques. Pourtant les écrans sont d'une meilleure définition maintenant. Et pour l'instant, les stylets des tablettes graphiques rendent une sensation de pointe de stylo à bille écrivant sur une surface dure, et le dessin suit difficilement un geste très rapide. Différentes solutions peuvent être apportées pour pallier à ces difficultés. Le crayon « Max » donnait sept degrés de liberté; il était en plus reconnu dès la proximité de l'écran, ce qui est une propriété utile, si l'on veut connaître le geste. Il offrait une certaine souplesse comme tous les stylets à pression, dont les « 126 niveaux » ne sont d'ailleurs pas discernables dans un coup de crayon ! Ce type de crayon n'a pas connu le développement attendu, à cause de son prix, de la concurrence des scanners qui permettent aux hommes de l'art de travailler de façon classique avec papier et crayon, avec des dimensions non limitées par la taille de l'écran.

Une autre concurrence a été celle des outils de repérage en 3D: les six degrés de liberté sont également donnés par des outils à base fixe, genre space-ball; les « dat aglove » en

donnent même bien plus; bouger un objet en 3D reste une opération délicate, dans la mesure où l'image que l'on a est sur un écran-plan, et donc le repérage des mouvements n'est pas simple.

Dans ce sens, les interfaces tel le « dataglove », ou les interfaces à « retour d'effort » en général, objets de nombreuses recherches en mécatronique, permettent de mieux utiliser le geste. Le « cyberglove » associé au « gestureplus », laisse le bout des doigts libres et sa souplesse permet de taper sur le clavier. Le gant « cybertouch » a une carapace de 18 vibro-stimulateurs, pour donner une sensation de rétroaction tactile (Ces gants sont développés par VTI [9]). En architecture intérieure, on pourrait par exemple imaginer mieux ressentir le toucher d'un revêtement mural...

Notre démarche est plutôt de mieux utiliser le 2D : le gant n'est pas l'outil idéal pour dessiner finement. Nous avons proposé une « plume » à deux points de contact, ce qui donne une mesure de pression et de rotation; ce n'est pas encore vraiment un pinceau, mais cela permet une richesse de possibilités de « dépôt de couleur », en forme, en teinte-intensité-saturation (TIS), et permet donc de mettre mieux en valeur le geste.

Un autre prototype de crayon est en cours de développement avec le laboratoire électronique de l'école ENSEE IHT de Toulouse : le « smartpen ». Il donne l'enregistrement du mouvement réel de la main, en position et en orientation et la traduction graphique du coup de crayon [10,11]. Dans un travail de conception, ce type d'outillage doit trouver son intérêt [5,9].

## 6. Démarche Kansei

Avec l'environnement de « DEVICE », nous sommes en phase avec l'ingénierie Kansei, qui veut dire « sensibilité » : nous nous retrouvons dans une tendance actuelle qui est au **user-friendly** - que certains traduisent en français par « amical », mais dont le sens original est « facile à utiliser, convivial » (d'après ROBERT & COLLINS) [9,12].

Cette mise en valeur du savoir-faire des concepteurs va dans le sens des courants actuels qui favorisent l'émergence de nouveaux concepts basés sur l'utilisation des sens et du jugement des « hommes de l'art » dans la réalisation de process plus affinés [13].

Le Kansei est une « aptitude humaine qui permet d'engendrer des images à partir de stimuli, et de les exprimer ». En outre le Kansei est affecté par la connaissance humaine et par l'« émotion ».

Ainsi, les premiers projets concernaient la visualisation des défauts dans une fabrication, où l'on cherchait à remplacer l'homme par la machine [14]. La démarche s'est élargie : lecture sur les lèvres (lipreading), mais aussi musique, avec les hyperviolons... d'une façon générale, la technologie de l'« émotion»...[15].

L'utilisation des différents sens affectés dans une étude de design d'objet ou d'habitation est « kansei ». On cherche à informatiser cette démarche. Les technologies Kansei sont au coeur de techniques permettant de développer de nouvelles interfaces. [15].

L'homme est bien au centre des processus de création, de design, marquant et marqué par « l'empreinte de ses sens » [16].

## 7. Un hyper-environnement

Nous souhaitons développer un environnement pour la conception en architecture. Notre proposition est un **Hyper environnement** basé sur un **tableau électronique, un crayon et un constructeur de menu.**

Il passe par l'utilisation d'*hyper-pinceaux* ou crayons ayant des propriétés en partie définissables par l'utilisateur, par un support *table à dessin*, par un constructeur de menu, pour disposer d'outils **efficaces et familiers**, en profitant des facilités apportées par l'Internet : hyperliens, objets 3D sous format .VRML..., mise à jour de bases de données, drivers des outils d'interfaces, travail de groupe, déplacements dans des espaces virtuels, en enseignement [17,18].

Notre démarche de base est un travail direct avec une machine active, au sens H-M-H. Les configurations de cet « hyperenvironnement » peuvent être variées, avec des associations en réseau pour le travail coopératif, mais la base de la réflexion est partie d'un environnement personnel, pour un travail coopératif. L'outil de base peut être alors un « carnet électronique », un écran d'ordinateur, ou même un tableau interactif, ou les uns et les autres reliés en réseau..., un constructeur de menu et un crayon multiparamétré.

Par exemple, sur le tableau, ou la table à dessin, un espace « scannérisation » de croquis, de plans sur papier serait efficace [19]. (Les tableaux « scannérisables » existent depuis plus de dix ans). Le constructeur de menu doit disposer d'une base fixe qui est fonction du type de problème à résoudre, et d'une partie modulable et révisable, adaptable - certains préconisent par apprentissage.

L'importance des différentes tailles de présentation, suivant le but poursuivi, le message à présenter : travail sur le terrain, au bureau, collectif ou conférence.... Avec les téléphones portables à images reliés au mail - Le Nokia 9100 était précurseur -, ce souhait est en train de se réaliser. Notre démarche du constructeur de menu et des crayons « intelligents » doit s'inscrire dans ce mouvement.

Différents outils sont en cours de réalisation. La partie « peinture » a été modélisée, sans pouvoir disposer d'outils multiparamétrés. Un constructeur d'alphabet et de symboles a été réalisé [7]. Il permet une réécriture « personnelle » à partir d'une frappe

au clavier, les lettres étant reliées par des splines. Au fur et à mesure, pour donner plus d'élégance et de naturel au tracé, des règles étaient ajoutées, d'autres doivent être construites de façon graphique. Certaines pourraient être automatisées, analysées, traitées... Cet exemple est une application Kansei.

Nous avons utilisé des langages tel le VRML, et des logiciels de CAO tel *Home Space Builder*; les mécanismes du Web apportent des possibilités de travail coopératif en design, par les facilités de mise en commun, de visualisation, la mise à jour de bases de données...

Nous avons avancé la notion d'hyperenvironnement [8]: (fig. 3)

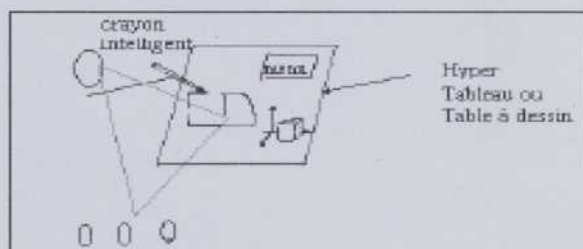


Figure 3. Un Hyper-environnement basé sur un écran de taille variée, du « carnet » au tableau électronique (schéma), un crayon multiparamétré et un constructeur de menu

Par exemple, dans un étude d'architecture, en recherche de l'imitation de la nature : (fig. 4). Cette démarche est une des bases de la conception architecturale. Nous avons proposé de considérer les intentions de conception, comme des projections/réflexions d'idées. Ces idées se traduisent sous la forme d'objets d'esquisse, et des opérateurs permettent la surimposition d'objets d'intention sur les objets esquisse initiaux [20]. Nous avons introduit des opérateurs de qualité (composition, équilibre, rythmes, élégance, symétries...). Les travaux de G. DE PAOLI [21], sur les opérateurs avec un vocabulaire de fonctions, pourraient prolonger notre démarche effective.

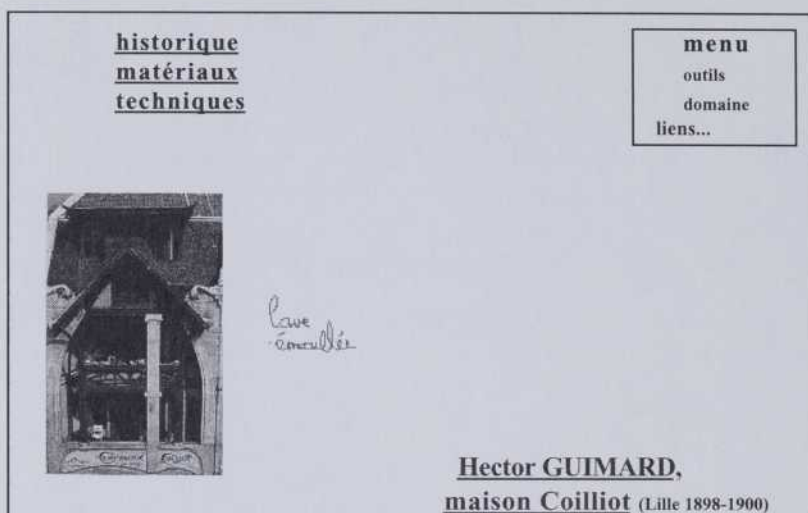


Figure 4. Écran interactif pour une étude d'Art Nouveau, avec un menu définissable par l'utilisateur

Des formes d'inspiration naturaliste, dans une démarche en phase avec le « Kansei ».

## 8. Le design comme sixième sens

Terminons par cette analyse de F. JOLLANT KNEEBONE [9] : « Le design comme sixième sens ? Dès la naissance, notre apprentissage du monde se fait à travers les cinq sens. (...) Pratiqué au cœur de la relation entre l'individu et son environnement sensible, le design est une activité nécessairement concernée par les sens. Aider à comprendre, à déchiffrer, trouver la relation au vécu, provoquer l'imaginaire, le design se pratique au bout des doigts, au ras des narines, à fleur de peau ou au fond des tympans. Dans un monde virtuel où nous perdons nos repères, l'approche sensible du design prend toute sa valeur. »

L'homme de l'art globalise une situation, en anticipant les données des sens qui lui manquent.

Un générateur sensible tel « Device », ouvert à d'autres contrôles que la vision et le geste par la souris, pourrait servir de banc d'essai. Mais nous pensons qu'il y a encore

beaucoup à faire, simplement aux niveaux visuel et gestuel, avec un crayon multiparamétré, par un dessin en 2D et en 3D. L'analyse des « sensations » est un domaine de recherche en design [9,13]. Elle est une des bases des métiers d'architecture.

La mise en valeur du geste et le développement de langages sont le centre de Workshops tel GW'99 [22]. Une démarche qui nous a marqué est celle de l'« hyperviolon » du MIT [24], bardé de capteurs. On cherche à comprendre la position du geste du musicien, à la fois comme recherche de performance, et ensuite comme apprentissage. C'est une démarche qui se rapproche de la notre; nous avons élargi les « hyperinstruments » à la notion d'« hyperenvironnement », en partie définissable par l'utilisateur.

## 9. Conclusion

En conclusion, nous assistons à un développement massif des activités de conception par ordinateur. De nombreux systèmes de CAO commencent à disposer d'une extension «.wrl» en VRML. Celle-ci rend accessible une visualisation sur l'internet d'objets 3D, avec des possibilités de mise à jour de fichiers. Nous pensons que si le 3D connaît un essor remarquable, il n'en reste pas moins qu'il y a encore beaucoup de développements intéressants à réaliser au niveau du dessin et du 2D et d'outils à créer. Les liens hypertextes et les mécanismes mis en jeu par l'internet doivent faciliter la mise en place de nouvelles fonctions de conception. Ce type d'instrument doit permettre ainsi de tracer des esquisses « renseignées », à partir d'environnements personnalisés, base de recherche dans de nombreux domaines [23].

Des outils tel que « DEVICE » vont aider à la mise en place de bancs d'essai pour réaliser des outils de dessin plus subtils, dans une démarche proche du Kansei.

## Références

- [1] D SCHON, 'The reflective practitioner : How professionals think in action', London, Temple Smith, 1983
- [2] J.P. CHUPIN, M. LEGLISE, 'Un carnet de schémas analogiques pour les phases préliminaires de la conception architecturale', RSTC vol. 5 n°2/1996, pp. 23-44, EUPOPIA pr., ISSN 1270-0517
- [3] R. GREGORY in 'What is intelligence', Cambridge University press, pp. 13-26, ISBN 0 521 56685 1

- [4] G. BOSVIEUX COILLIOT, D. BOISSIER, 'Gesture Tools for Design', *Revue Sciences et Techniques de la Conception (RSTC) Vol.1, No1 1992*, Hermès, Paris pp. 31-48
- [5] G BOSVIEUX COILLIOT, P SZALAPAJ, D BOISSIER, 'Design environment with visual interaction'  
10th ICED'95, August 22-24, 1995, Prague, Tchequoslovaquie, pp. 650-655, ISBN-85693-028.0
- [6] G. BOSVIEUX COILLIOT, V. CORDONNIER, 'GICOM : Gesture interactivity in a constructor of menu', SID 5-90, Las Vegas May 1992, ed. Jay Morraele, Palisade Insti. Inc.vol XXI, pp. 173-176, ISSN 0097-966X
- [7] G. BOSVIEUX COILLIOT, 'Customisation for Human-friendly MMI. A Handwriting example'. ROMAN'98, 7th IEEE Int. Worksh. on Robot and human communica., Sept.30-Oct.2, 1998, Takamatsu, Japan, pp. 588-591
- [8] G. BOSVIEUX COILLIOT, *Intelligent Capture Tools for Teaching. A school case Example with Power Electronics. EAEEIE'99*, Capri, Italie
- [9] *Revue [dizajn]*, n°19, 1999, les Ateliers, Paris
- [10] G. BOSVIEUX COILLIOT, J.L.TOURNIER, 'Designing Intelligent Multiparameterised Devices : a Mechatronics Field', ICRAM'99, Istanbul, Turquie, Mai 99
- [11] J.L.TOURNIER, J.DAVID, M.CATTOEN: '3D localisation system', 2° Japan-France Congress on mechatronics, Takamatsu, Japan, nov 1-3, 1994, , Vol 2, p. 643.
- [12] IEEE/Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 99), Hiroshima, Oct. 17-21, (to pub.)
- [13] J.F. BASSEREAU, R. DUCHAMP, 'Du Différentiel sémantique au profil sensoriel', RSTC vol. 5 n°2/1996, pp 45-74, EUROPIA pr., ISSN 1270-0517
- [14] S. HATA & al, 'Human Sensitivity, 'Kansei', in *Visual Inspection System*', Mecatronics'96, Besançon, pp.761-766
- [15] 'RO-MAN'98, 7th IEEE Int. Workshop on Robot and human communication, Sept.30-Oct.2 1998, Takamatsu, Japan
- [16] J. NINIO, '*L'empreinte des sens*', 1989, Odile Jacob Ed.
- [17] G. SAUGIS, '*Interface 3D pour le travail coopératif synchrone, une proposition*', Thèse de Doct., UST-Lille, 1998
- [18] A. A. ANGHERN, T. NABEHT, ' Leveraging Emerging Technologies in Management Education: Research and Experiences', *European Management Journal*, Vol. 15, n°3, pp. 275-285, 1997.
- [19] S. WHITTAKER, H. SCHARWZ, 'Back to the future : Pen and paper technology Supports Complex Group Coordination ', CHI'95, *Mosaic of creativity*, p. 495-502
- [20] P. SZALAPAJ, G. BOSVIEUX, 'Customising Cooperative Design' *Fifth EurolA 95*, Lyon, 12-14 Déc, p. 391-400

- [21] G. DE PAOLI, 'La CAO en architecture : modélisation des actions et définition des opérateurs', *01 Design '97*, EUROPIA Pr, ISBN 2-909285-10-3, pp. 197-209.
- [22] GW'99, *3rd Gesture Workshop*, 17-19 Mars 99, Paris
- [23] M. YVON, F. LEFÈVRE, P. PIERNOT, 1994, 'Adaptive and demonstrational User Interfaces applied to Telecommunication Services', *EWHCI'94* St Petersburg, vol II, pp. 49-61.
- [24] hyperviolin : <http://theremin.media.mit.edu/hyper.html>

BNQ



000 307 202

L'informatique et ses applications réussissent à occuper une place grandissante dans les agences d'architecture ainsi qu'au niveau de l'enseignement et de la recherche en architecture. La table à dessin est remplacée par des outils électroniques qui offrent et ouvrent des possibilités nouvelles tant au niveau de la présentation et de la communication de projets d'architecture que de la conception ou de l'évaluation de ces projets. Ce changement des outils de travail en architecture nous amène progressivement à considérer la définition d'un nouveau paradigme qui va être accompagné de nouvelles pratiques pour la conception, la communication et la figuration architecturales. Ainsi, le mot clé « dessin » si longtemps et souvent associé à la conception et à la communication architecturales, est lentement substitué par un terme nouveau, la « modélisation ». Cette substitution de termes nous semble loin d'être anodine et peut en fait cacher une révision de concepts et d'approches en architecture que nous soupçonnons pouvoir se répercuter au niveau des méthodes et des finalités recherchées pour la figuration pendant un processus de conception architecturale.

**Ont collaboré à la rédaction de cet ouvrage :**

Myriam Blais, Marius Bogdan, Geneviève Bosvieux-Coilliot, Giovanni De Paoli, Manon Guité, Ivanka Iordanova, Iréna Latek, Michel Légglise Alain Marty, Claude Parisel, Lozka Popova, Temy Tidafi, Elvire Q. Wang, Jacques White.

ISBN 2-89245-152-3



9 782892 451528